



# **Zur Erkennung unvermeidbarer Kollisionen von Kraftfahrzeugen mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien**

Simon Karrenberg

Berichte aus dem DLR-Institut  
für Verkehrssystemtechnik

Band 2



**Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.**  
in der Helmholtz-Gemeinschaft



**Zur Erkennung unvermeidbarer Kollisionen von  
Kraftfahrzeugen mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines **Doktor-Ingenieurs** (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: **Simon Karrenberg**

aus (Geburtsort): **Hamburg**

eingereicht am: **29.4.2008**

mündliche Prüfung am: **3.9.2008**

Referenten: **Prof. Dr. Karsten Lemmer** und  
**Prof. Dr. Ulrich Seiffert**

**2008**



**Zur Erkennung unvermeidbarer Kollisionen von  
Kraftfahrzeugen mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien**

**Simon Karrenberg**

**Herausgeber:**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Institut für Verkehrssystemtechnik  
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

**ISSN 1866-721X**

DLR-TS 1.2

Braunschweig, im September 2008

Institutsdirektor:  
Prof. Dr.-Ing Karsten Lemmer

Verfasser:  
Simon Karrenberg



## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Doktorand im Bereich „Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit“ der Volkswagen AG.

Bei Herrn Professor Dr.-Ing. Karsten Lemmer, Leiter des Instituts für Verkehrssystemtechnik des DLR Braunschweig, möchte ich mich für die intensive Betreuung dieser Arbeit bedanken. Er hat viele wissenschaftliche Anregungen in diese Arbeit eingebracht.

Für die Übernahme des Korreferates danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Ulrich Seiffert, der mich mit seiner Erfahrung und mit klaren Worten immer wieder in die richtige Richtung gelenkt hat.

Danken möchte ich Dr.-Ing. Christoph Kessler und Dr.-Ing. Arne Bartels für die Betreuung seitens der Volkswagen AG. Besonderer Dank gilt Dr. Bartels, der das Ziel stets im Blick hatte und so wesentlich zum Abschluss dieser Arbeit beigetragen hat.

Bei Dr. Richard Auer, Bernhard Müller-Beßler, Gregor Stock und Robert Laßlop möchte ich mich für die intensive Zusammenarbeit am „GTI 53+1“ bedanken. Das entwickelte Fahrzeug habe ich nach seiner öffentlichen Vorstellung als Versuchsträger verwendet. Ohne dieses Team wäre die vorliegende Arbeit nicht entstanden.

Den Studenten Ralph Latotzki und Boris Bensmann möchte ich für ihre großartige Unterstützung danken. Ihr Fleiß und ihr Feilen an Details haben wesentlich zur Qualität der Ergebnisse beigetragen.

Bei den Kollegen Thomas Eigel und Frank Schroven bedanke ich mich für die kritische Betrachtung meiner Arbeit. Sie haben jeden Aspekt hinterfragt.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir diesen Lebensweg ermöglichten und mich bis zum Ende meiner Promotionszeit in jeder Hinsicht unterstützt haben.

Meiner Frau und unseren Kindern danke ich dafür, dass sie so viel Verständnis für diese Arbeit aufgebracht haben.

Braunschweig, im September 2008

Simon Karrenberg





**Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.**



# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>xv</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>xvii</b>
<b>Summary</b>	<b>xix</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Aufbau der Arbeit . . . . .	2
<b>2 Stand der Technik: Automatische Notbremsung</b>	<b>3</b>
2.1 Funktionsweise . . . . .	3
2.2 Einordnung als Fahrerassistenzsystem . . . . .	6
2.3 Sicherheitsgewinn und rechtliche Bewertung . . . . .	7
2.4 Verfügbare Systeme . . . . .	10
2.5 Auslösekriterien . . . . .	11
<b>3 Methode und Thesen</b>	<b>19</b>
3.1 Stellvertretertrajektorie . . . . .	19
3.2 Situationsbewertung mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien . . . . .	29
3.3 Thesen . . . . .	34
<b>4 Theoretische Grundlagen</b>	<b>37</b>
4.1 Fahrzeugmodell . . . . .	37
4.2 Optimierung . . . . .	41
<b>5 Kollisionsvorhersage mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien</b>	<b>55</b>
5.1 Stellvertretertrajektorienberechnung als Problem der optimalen Steuerung . . . . .	55
5.2 Anpassungen für die numerische Berechnung . . . . .	66
5.3 Bewertung von Verkehrssituationen . . . . .	67
<b>6 Fahrversuch und Anwendung des Verfahrens</b>	<b>69</b>
6.1 Versuchsdesign . . . . .	69
6.2 Versuchsdurchführung . . . . .	72
6.3 Auswertung . . . . .	77
<b>7 Fazit und Ausblick</b>	<b>89</b>
<b>Glossar</b>	<b>91</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>95</b>



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Entwicklung der Zahl der Verkehrstoten, Quelle: CARE(Mah07)	1
2.1	Funktionsweise	3
2.2	Wahrscheinlichkeit, an den Folgen einer Kollision zu sterben über der Fahrzeuggeschwindigkeit nach Preusser	8
2.3	Auslösekriterium nach Kopischke	12
2.4	Auslösekriterium nach Busch	13
2.5	Verfolgung von Aufenthaltsgebieten	14
2.6	Zeitliche Abfolge der Kollisionserkennung bei einem Hindernis	15
2.7	Zeitliche Abfolge der Kollisionserkennung bei mehr als einem Hindernis	16
3.1	Funktionsweise der Situationsbewertung mit Stellvertretertrajektorien	20
3.2	Versuchsanordnung	22
3.3	Trajektorien der Versuchspersonen in der Draufsicht	23
3.4	Beschleunigung in X- und Y-Richtung	24
3.5	Längs- über Querschleunigung im Kamm'schen Kreis	25
3.6	Trajektorien der Versuchspersonen und eine Stellvertretertrajektorie in der Draufsicht	26
3.7	Beschleunigung in X- und Y-Richtung	27
3.8	Längs- über Querschleunigung im Kamm'schen Kreis	28
3.9	Verkehrssituation	31
3.10	Stellvertretertrajektorien in der Draufsicht	32
3.11	Beschleunigung in X- und Y-Richtung	33
3.12	Längs- über Querschleunigung im Kamm'schen Kreis	34
4.1	Kräfte und geometrische Größen des Einspurmodells	38
4.2	Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennlinie gemäß der Pacejka Magic Formula	41
4.3	Eindimensionale Optimierung unter Nebenbedingungen	43
4.4	Mehrdimensionale Optimierung unter Nebenbedingungen	44
4.5	Portalkran nach Margono	48
4.6	Beispielfunktion mit einem lokalen und einem globalen Minimum	53
5.1	Verkehrssituation	56
5.2	Kontur des Fahrzeugs	59
5.3	Fahrbahn	60
5.4	Kontur des Hindernisses	61
6.1	Versuchsanordnung	70
6.2	Histogramm der Reaktionszeiten	73
6.3	Histogramme der Geschwindigkeit zum Auslösezeitpunkt	74

6.4	Histogramm des Gierwinkels zum Auslösezeitpunkt . . . . .	75
6.5	Histogramm der Quergeschwindigkeit zum Auslösezeitpunkt . . . . .	76
6.6	Histogramm der Ablage zum Auslösezeitpunkt . . . . .	76
6.7	Übersicht: Erfolg je nach gemessener Maximalbeschleunigung und berechneter notwendiger Beschleunigung . . . . .	78
6.8	Histogramm des Quotienten von gemessener zu berechneter Be- schleunigung . . . . .	79
6.9	Verhältnis von kollisionsbehafteten zu kollisionsfreien Messfahrten über dem Quotienten von gemessener zu berechneter Beschleuni- gung . . . . .	80
6.10	Histogramm der berechneten Beschleunigung . . . . .	81
6.11	Verhältnis von kollisionsbehafteten zu kollisionsfreien Messfahrten über der berechneten Beschleunigung . . . . .	82
6.12	Zeitliche Abfolge der Kollisionserkennung . . . . .	84
6.13	Zeitliche Abfolge der Kollisionserkennung . . . . .	85

## Symbolverzeichnis

$a$	Beschleunigungsvektor $a = (a_1, a_2)$
$a_{VA}$	maximale Beschleunigung zur Verfolgung von Aufenthaltsgebieten
$a_{Schwell}$	Schwellwert für die Auslösung der automatischen Notbremsung
$\alpha_v$	Schräglaufwinkel am Vorderrad
$\alpha_h$	Schräglaufwinkel am Hinterrad
$b$	Fahrzeugbreite
$b_{Hind}$	Hindernisbreite
$b_{Fahrbahn}$	Fahrbahnbreite
$B$	Steifigkeitsfaktor (Pacejka Magic Formula)
$\beta$	Schwimmwinkel
$C$	Formfaktor (Pacejka Magic Formula)
$d_s$	Abstand zwischen dem Schwerpunkt und der Fahrzeugfront
$d_v$	verkürzter Abstand zwischen dem Schwerpunkt und der Fahrzeugfront
$d_h$	Abstand zwischen dem Schwerpunkt und dem Fahrzeugheck
$D$	Maximalwert (Pacejka Magic Formula)
$\delta$	Vorderradeinschlagwinkel
$E$	Krümmungsfaktor (Pacejka Magic Formula)
$F$	Qualitätsfunktional (auch Zielfunktion oder Zielfunktional)
$F_B$	Bremskraft
$F_{sv}$	Seitenkraft am Vorderrad
$F_{sh}$	Seitenkraft am Hinterrad
$F_{uv}$	Umfangskraft am Vorderrad
$F_{uh}$	Umfangskraft am Hinterrad
$g$	Nebenbedingung oder Nebenbedingungen
$g_{Erde}$	Erdbeschleunigung $g_{Erde} = 9.81 \frac{m}{s^2}$
$G$	Bewertungsfunktion
$I_{zz}$	Trägheitsmoment um die Hochachse
$k_1, \dots, k_8$	Normierungsfaktoren für die Zustandsvariablen
$l_h$	Entfernung vom Mittelpunkt zum Hinterrad
$l_v$	Entfernung vom Mittelpunkt zum Vorderrad
$L$	Soll-Auslöseabstand
$m$	Masse des Fahrzeugs
$M$	Schwerpunkt des Fahrzeugs
$\mathcal{M}_\nu$	Menge aller kollisionsfreien Trajektorien für $\nu$
$\mu_h$	Haftreibungskoeffizient

$\omega_z$	Gierrate $\omega_z = \dot{\psi}$
$P_1 \dots P_7$	Konturpunkte des Fahrzeugs
$P_{kritisch}$	kritischer Punkt des Hindernisses
$\psi$	Gierwinkel
$t_0$ und $t_f$	Start- und Endzeit
$t_{tc}$	Zeit bis zur Kollision
$t_g$	Zeitlücke
$u$	Steuerfunktionen $u = (u_1, u_2)$
$u_1$	die Bremskraft
$u_2$	die Lenkrate
$\tilde{u}$	Vektor zur Parametrisierung der Steuerfunktion
$u^*$	optimale Steuerfunktion als Lösung eines Optimalsteuerungsproblems
$u_p$	parametrisierte Steuerfunktion
$v$	Geschwindigkeit des Mittelpunkts
$v_v$	Geschwindigkeit des Vorderrads
$v_h$	Geschwindigkeit des Hinterrads
$\mathcal{V}$	Verkehrssituation
$x$	Zustandsvariablen $x = (x_1, \dots, x_8)$
$x_1$	X-Position
$x_2$	Y-Position
$x_3$	Gierwinkel
$x_4$	Gierrate
$x_5$	Schwimmwinkel
$x_6$	Geschwindigkeit
$x_7$	Lenkwinkel
$x_8$	Hilfsgröße
$x^*$	Lösung einer Optimierungsaufgabe
$x_{global}^*$	globale Lösung
$x_{lokal}^*$	lokale Lösung
$X$ und $Y$	Symbole zur Bezeichnung der Achsen eines ebenen Koordinatensystems
$\mathcal{X}$	zulässige Menge für $x$



## Zusammenfassung

Eine wesentliche Steigerung der Sicherheit im Straßenverkehr ist mit Systemen möglich, die bereits vor einer Kollision aktiv werden. Eine herausragende Rolle unter diesen Systemen nimmt die automatische Notbremsung ein, die ohne Zutun des Fahrers eine Notbremsung ausführt. Dazu wird das Umfeld mit geeigneten Sensoren – beispielsweise Radaren und Laserscannern – abgetastet. Die Qualität einer automatischen Notbremsung hängt maßgeblich vom Auslösekriterium ab, mit dem die aufgenommen Umfelddaten anschließend interpretiert werden. Je früher eine unvermeidbare Kollision als solche erkannt wird, desto größer ist der Sicherheitsgewinn der automatischen Notbremsung.

Die aktuellen Auslösekriterien haben in Verkehrssituationen mit mehreren relevanten Hindernissen Schwächen, die dazu führen, dass die automatische Notbremsung verspätet ausgelöst wird. In dieser Arbeit wird ein neuartiges Verfahren zur Bewertung von Verkehrssituationen vorgestellt. Dabei wird zunächst eine spezielle Trajektorie – die sogenannte Stellvertretertrajektorie – berechnet und danach eine Kenngröße dieser Stellvertretertrajektorie zur Bewertung der Verkehrssituation und auch zur Auslösung der automatischen Notbremsung genutzt. Die Stellvertretertrajektorie zeichnet sich dadurch aus, dass sie einerseits kollisionsfrei ist und andererseits bei minimalem Reibbeiwert realisierbar ist. In dieser Arbeit wird unter anderem beschrieben, wie aus unendlich vielen Trajektorien eine solche Stellvertretertrajektorie ausgewählt werden kann.

Zum Test des Verfahrens wurde ein Fahrversuch durchgeführt, in dem Probanden in insgesamt 840 Messfahrten bewusst in kritische Verkehrssituationen gebracht wurden. Auf Basis dieses Fahrversuchs wird festgestellt, dass die Situationsbewertung mit Hilfe von Stellvertretertrajektorie geeignet ist, um unvermeidbare Kollisionen zu erkennen. Das Verfahren weist gegenüber den aktuellen Auslösekriterien Vorteile auf. Allerdings haben sich Fragen auch ergeben, die vor einem Einsatz des Verfahrens abzuklären sind.



## Summary

It is possible to increase traffic safety substantially with systems which become active before a collision. Automatic emergency braking, which performs an emergency stop without driver intervention, holds a pre-eminent position among these systems. The surroundings are monitored with appropriate sensors, for example radar and laser scanners. The quality of an automatic emergency stop depends primarily on the trigger criteria with which data registered from the surroundings are then interpreted. The sooner an unavoidable collision is identified as such, the greater is the gain in safety through the automatic emergency stop.

The present trigger criteria exhibit weaknesses in traffic situations with multiple relevant obstacles, which result in the automatic braking being triggered too late. A new process for the evaluation of traffic situations will be presented in this paper. The first step in this process is that a special trajectory – the so-called proxy trajectory – is calculated and then a parameter of this proxy trajectory is used for the evaluation of the traffic situation as well as for the triggering of the automatic emergency braking. Two outstanding features of the proxy trajectory are that first, it is collision free and, second, it can be realised with a minimal friction coefficient. This paper will describe, among other things, how such a proxy trajectory can be chosen from among an infinite number of trajectories.

To test the procedure, a driving test was performed in which test subjects were intentionally placed in critical traffic situations in a total of 840 tests. It was determined on the basis of this driving test that situation evaluation with the aid of proxy trajectory is appropriate for identifying unavoidable collisions. The process demonstrates advantages over the current trigger criteria. However, questions have arisen which must be clarified before the process can be implemented.



# 1 Einleitung

Die Mobilität von Personen und Gütern ist eine Voraussetzung für ein erfolgreiches Zusammenwachsen der europäischen Staaten. Ein großer Teil dieser Mobilität wird mit Kraftfahrzeugen erreicht. Ihre Anzahl sowie die von ihnen insgesamt zurückgelegte Strecke nehmen stetig zu. Im selben Maß ist leider auch die Anzahl von Unfällen im Straßenverkehr gestiegen. Dieser Tatsache steht der erfreuliche Rückgang der Anzahl von Personen entgegen, die innerhalb eines Jahres im Straßenverkehr in der Europäischen Union getötet wurden. Ihre Anzahl ist seit 1991 von 71160 auf 41300 im Jahr 2005 gesunken (Abbildung 1.1).<sup>(a)</sup> Dies entspricht einem Rückgang von 42%.

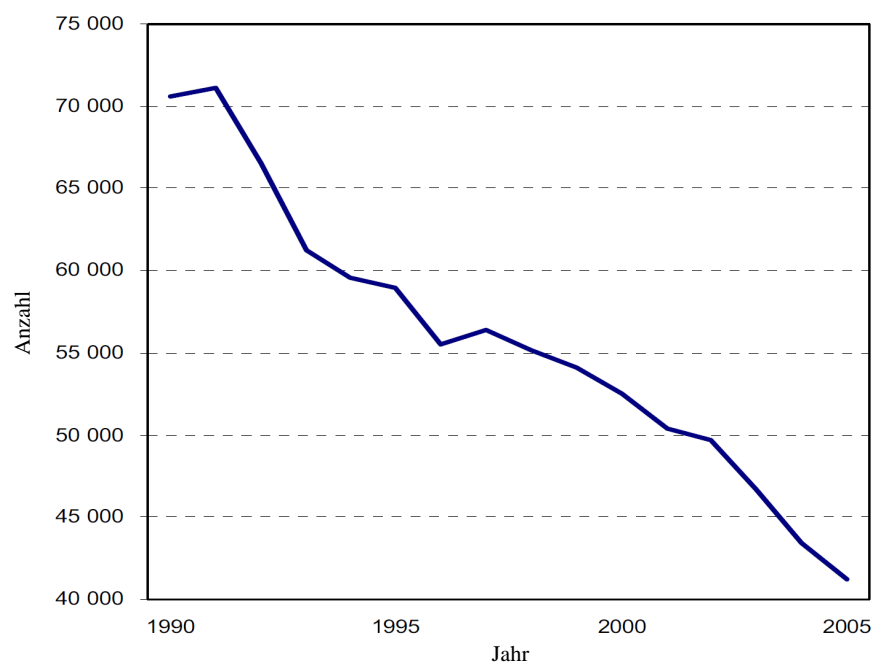


Abbildung 1.1: Entwicklung der Zahl der Verkehrstoten, Quelle: CARE(Mah07)

In Deutschland ist die Anzahl der Personen, die nach Unfällen im Straßenverkehr gestorben sind, ebenfalls seit Jahren rückläufig und hat 2007 mit 4970<sup>(b)</sup> einen historischen Tiefststand erreicht (Sta07; Sta08).

Die fahrzeugtechnischen Maßnahmen zur Minimierung der Unfallfolgen haben wesentlich zu dieser Entwicklung beigetragen. Zu diesen Maßnahmen gehören unter anderem die stabile Fahrgastzelle, der Sicherheitsgurt und der Airbag. Einen weiteren wesentlichen Beitrag haben Systeme erzielt, die den Fahrer bei der Unfallvermeidung unterstützen können. Zu ihnen gehören ABS und ESP, wobei ESP eine herausragende Rolle spielt: ESP rettet Jahr für Jahr mehr Menschenleben als der Airbag (ZSB<sup>+</sup>04).

<sup>(a)</sup>Bezogen auf die 25 Staaten, die seit dem 1.5.2004 der Europäischen Union angehören

<sup>(b)</sup>Vorläufiger Wert des statistischen Bundesamts

Seit 2006 sind Systeme erhältlich, die eine automatische Notbremsung durchführen und dadurch der Minimierung von Unfallfolgen dienen. Sobald mit Hilfe von Umfeldsensoren erkannt wird, dass eine Kollision unvermeidbar ist, wird ohne Zutun des Fahrers gebremst.

Ein zentraler Bestandteil eines Systems zur automatischen Notbremsung ist das Auslösekriterium, mit dem Verkehrssituationen, die unvermeidbar zu einer Kollision führen, als solche erkannt werden. Die aktuellen Auslösekriterien haben in Situationen mit mehreren relevanten Hindernissen Schwächen, die dazu führen, dass die automatische Notbremsung verspätet ausgelöst wird.

In dieser Arbeit wird ein neuartiges Verfahren zur Erkennung unvermeidbarer Kollisionen untersucht. Die Funktionsweise unterscheidet sich deutlich von den bisherigen Verfahren, denn es wird zunächst eine spezielle Trajektorie – die sogenannte Stellvertretertrajektorie – berechnet und dann mit Hilfe dieser Stellvertretertrajektorie eine Situationsbewertung durchgeführt. Das Verfahren bietet Vorteile in Verkehrssituationen, in denen mehrere relevante Hindernisse involviert sind.

### 1.1 Aufbau der Arbeit

Die automatische Notbremsung als Anwendung der Situationsbewertung mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien wird in Kapitel 2 dargestellt. Auf die aktuellen Auslösekriterien wird dabei ausführlich eingegangen.

In Kapitel 3 wird die neuartige Situationsbewertung von Verkehrssituationen mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien vorgestellt. Die formalen Definitionen werden anhand von Beispielen veranschaulicht. Das Kapitel endet mit der Formulierung von Thesen, die im Folgenden widerlegt werden sollen.

Die Bestimmung einer Stellvertretertrajektorie stellt ein Problem der optimalen Steuerung dar. Diese Probleme werden in Kapitel 4 als unendlichdimensionale Optimierungsprobleme dargestellt. Für die Berechnung werden ein Fahrzeugmodell und ein Reifenmodell benötigt. Die beiden verwendeten Modelle werden ebenfalls in Kapitel 4 beschrieben.

Gegenstand des Kapitel 5 ist Vorhersage von Kollisionen für eine spezielle Klasse von Verkehrssituationen. Das zu lösende Problem der optimalen Steuerung wird in einer Form angegeben, in der es von einem Algorithmus verarbeitet werden kann. Ferner werden einige Anpassungen des Algorithmus aufgeführt.

Der Probandenversuch, mit dem das neuartige Verfahren getestet wird, ist in Kapitel 6 dargestellt. Es wird der Nachweis der Funktionalität geführt und die Thesen, die in Kapitel 3 aufgestellt wurden, werden widerlegt. Das Kapitel endet mit einem Vergleich der aktuellen Auslösekriterien und der Situationsbewertung mit Hilfe von Stellvertretertrajektorie.

Das abschließende Kapitel 7 fasst die wichtigsten Ergebnisse zusammen und führt die Fragen auf, die vor einem Einsatz des vorgestellten Verfahrens abzuklären sind.

## 2 Stand der Technik: Automatische Notbremsung

Die Hauptanwendung für die Bewertung von Verkehrssituationen mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien ist die Auslösung einer automatischen Notbremsung. In diesem Kapitel wird der Stand der Technik der automatischen Notbremsung dargestellt. Die Funktionsweise, der Sicherheitsgewinn, eine rechtliche Bewertung sowie eine Einordnung als Fahrerassistenzsystem und eine Aufzählung verfügbarer Systeme werden kurz dargestellt. Es folgt eine ausführliche Beschreibung der Auslösekriterien.

### 2.1 Funktionsweise

Der Raum vor dem Ego-Fahrzeug<sup>(a)</sup> wird mit geeigneten Umfeldsensoren beobachtet. Falls mehrere Sensoren gleichzeitig zum Einsatz kommen, werden deren Daten in einer Sensordatenfusion zusammengeführt. Ferner werden die fahrdynamischen Größen des Ego-Fahrzeugs bestimmt. Die anschließende Situationsbewertung ermittelt, ob dieensierte Verkehrssituation unvermeidbar zu einer Kollision führen wird. Nur in diesem Fall wird eine Notbremsung ausgelöst. Die automatische Notbremsung wird nicht ausgelöst, wenn der Fahrer die Kollision durch Bremsen, Lenken oder eine Kombination von beiden verhindern könnte (Bus04; JJG02). Die Funktionsweise wird in Abbildung 2.1 als Blockschaltbild dargestellt. Da es nach einer Auslösung der automatischen Notbremsung stets zur Kollision kommt, stellt die automatische Notbremsung ein System zur Reduktion der Unfallfolgen dar.

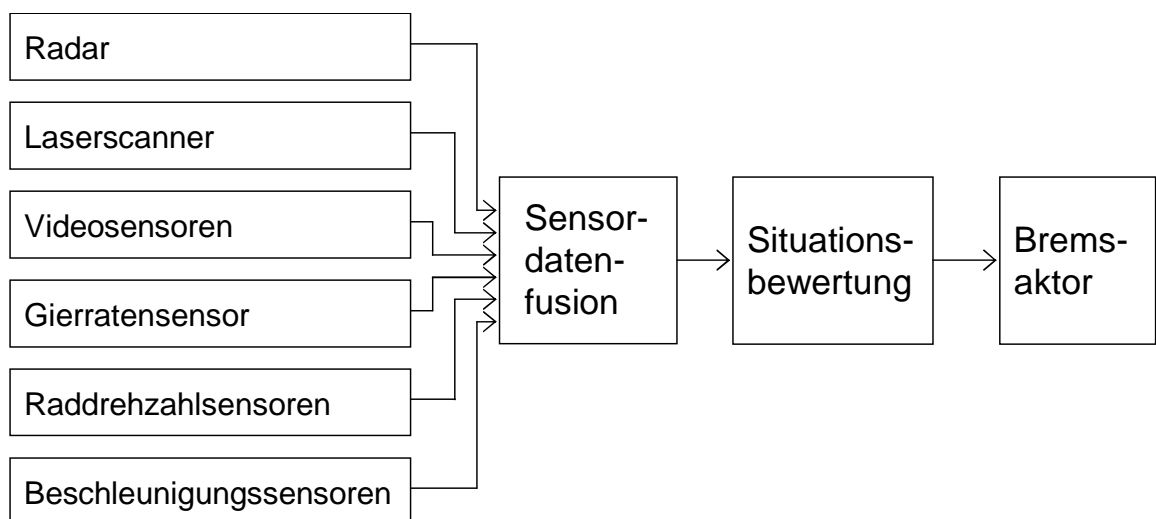


Abbildung 2.1: Funktionsweise

<sup>(a)</sup>Als Ego-Fahrzeug wird hier das Fahrzeug bezeichnet, welches mit der automatischen Notbremse ausgestattet ist.

Die Sensoren bestimmen die Ausdehnung und die Bewegungsparameter der Objekte im Raum vor dem Ego-Fahrzeug. Die verschiedenen Sensoren haben unterschiedliche Stärken und Schwächen, wobei festzustellen ist, dass kein einzelner Sensor alle Anforderungen erfüllt. Deshalb werden unterschiedliche Sensoren eingesetzt, deren Daten in einer Sensordatenfusion zusammengefasst werden. Die Minimalanforderung an die fusionierten Daten ist eine hinreichend genaue Bestimmung des Abstands, der Relativgeschwindigkeit und der Ausdehnung der Objekte im Umfeld des Ego-Fahrzeugs. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit werden im Folgenden die wichtigsten Sensortypen beschrieben.

**Radarsensoren** Die Stärke von Radarsensoren ist die Bestimmung von Abstand und Relativgeschwindigkeit, denn beide Größen können direkt gemessen werden (Pij07). Der Abstand wird über die Laufzeit und die Phasenlage des reflektierten Radarstrahls ermittelt. Die Relativgeschwindigkeit dagegen wird aus der Dopplerverschiebung abgeleitet und kann dadurch genauer als mit allen anderen Sensoren bestimmt werden. Eine weitere Stärke ist die hohe Robustheit gegen Niederschläge und Nebel und die uneingeschränkte Funktion bei Dunkelheit. Nachteilig ist, dass Größe und Querposition von Objekten nicht zuverlässig bestimmt werden können. Insbesondere bei stationären Objekten wirken sich diese Einschränkungen negativ aus. Beispielsweise kann eine Getränkedose nicht von einem Baum unterschieden werden. Auch der Winkel, unter dem ein Objekt erkannt wird, kann nicht präzise gemessen werden.

**Video-Sensoren** Video-Sensoren können monokular oder stereoskopisch ausgelegt werden – verfügen also über eine oder zwei Kameras. Mit Videosystemen können Objekte gut klassifiziert werden. Beispielsweise können Bäume von Fahrzeugen und Fußgängern unterschieden werden. Monokulare Systeme können Breite und Höhe von Objekten ermitteln. Dazu muss die Entfernung mit einem weiteren Sensor – etwa einem Radar – bestimmt werden. Stereoskopische Systeme können Abstand, Breite und Höhe ohne weitere Sensoren bestimmen. Videosysteme sind stark abhängig von den Licht- und Sichtverhältnissen. Bei blendender Sonneneinstrahlung oder Dunkelheit, sowie bei Schneefall, starkem Regen und Nebel ist die Funktion eingeschränkt. Relativgeschwindigkeiten können nur als Ableitung der Entfernung gewonnen werden.

**Laserscanner** Über einen rotierenden Spiegel werden die Blitze einer Laserdiode ausgesendet. Mit dem gleichen Spiegel werden die reflektierten Blitze zu einer Fotodiode geleitet. Aus der Laufzeit des Lichts und der Stellung des Spiegels können Richtung und Entfernung bestimmt werden. Die Drehung des Spiegels führt zu einer fächerförmigen Abtastung des Umfeldes. Ausgedehnte Objekte werden an mehreren Stellen vermessen, sodass eine Kontur abgeleitet werden kann. Laserscanner können die Breite und Entfernung von Objekten bestimmen.



	Radarsensoren	Video-Sensoren	Laserscanner	Lidarsensoren
Abstandsbestimmung	++	o	+	+
Bestimmung der Relativgeschwindigkeit	++	o	o	o
Bestimmung der Querbreite	--	++	++	+
Bestimmung der Querposition	-	++	++	+
Klassifikation von Objekten	-	++	+	o
Funktion bei Sichteinschränkungen	++	-	o	o

Tabelle 2.1: Eigenschaften ausgewählter Sensoren

In Grenzen können sie auch den relativen Gierwinkel<sup>(b)</sup> schätzen.

**Lidarsensoren** Eine Laserdiode sendet einen kurzen Puls aus, dessen Reflektion von einer Fotodiode gemessen wird. Aus der Laufzeit eines reflektierten Laserstrahls wird auf die Entfernung eines Objekts geschlossen. Die Richtung, in die der Laserstrahl ausgesendet wird, kann fix oder variabel sein. Die Funktionalität wird durch Sichteinschränkungen negativ beeinflusst.

Tabelle 2.1 fasst die Eigenschaften der verschiedenen Sensoren noch einmal zusammen. Es ist zu erkennen, dass Radar- und Videosensoren größtenteils komplementäre Eigenschaften aufweisen. Werden sie zusammen eingesetzt, so können alle wesentlichen Messgrößen zur Auslösung einer automatischen Notbremsung bestimmt werden.

Da alle Messwerte stets mit Fehlern behaftet sind, ist auch das abgeleitete Abbild der Umwelt fehlerbehaftet. Die Auswirkung auf die Bewertung der Verkehrssituation wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet und muss Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Der Einsatz mehrerer Sensoren mit unterschiedlichen Messprinzipien steigert die Qualität der gemessenen Größen sowie deren Verfügbarkeit, wenn die Daten

<sup>(b)</sup>Winkel zwischen den Längsachsen des eigenen und eines anderen Fahrzeugs

in geeigneter Weise zusammengefasst werden. Die Zusammenfassung geschieht in der sogenannten Sensordatenfusion. Diese führt eine Liste erkannter Objekte im Umfeld des eigenen Fahrzeugs. Die Objekte werden in verschiedene Klassen eingeteilt – beispielsweise „stationäres Hindernis“, „Fußgänger“, „fahrendes Fahrzeug“ oder „stehendes Fahrzeug“. Die Objekte werden durch mehrere Zustandsgrößen beschrieben, wobei für verschiedene Klassen unterschiedliche Zustandsgrößen benutzt werden. Beispielsweise hat ein „stehendes Fahrzeug“ einen Gierwinkel aber keine Geschwindigkeit, wohingegen ein „stationäres Hindernis“ weder Gierwinkel noch Geschwindigkeit hat. Die Sensordatenfusion nutzt zur Schätzung der Zustandsgrößen in der Regel ein Kalman-Filter. Das Filter verarbeitet die Messwerte der verschiedenen Sensoren zusammen mit ihren Messunsicherheiten. Weiterhin werden Bewegungsmodelle der Objekte und Modelle der Sensoren benötigt. Als Ergebnis werden die Zustandsgrößen geschätzt, wobei die Stärken und Schwächen der verschiedenen Sensoren optimal berücksichtigt werden (Stü03).

Auf die Fusionierung der Daten folgt die Interpretation. Mit verschiedenen Verfahren kann entschieden werden, ob eine Kollision unvermeidbar eintreten wird. Die sogenannten Auslösekriterien werden in Abschnitt 2.5 beschrieben. Wird mit Hilfe des gewählten Kriteriums eine unvermeidbare Kollision erkannt, so erfolgt eine Notbremsung mit maximaler Verzögerung.<sup>(c)</sup> Bei Bedarf wird die Bremskraft jedoch reduziert oder aufgehoben, um dem Fahrer die Querführung des Fahrzeugs zu ermöglichen.

### 2.2 Einordnung als Fahrerassistenzsystem

Die automatische Notbremsung dient der Unfallfolgenreduktion und greift wie andere Fahrerassistenzsysteme in die Fahrzeugführung ein. Tabelle 2.2 listet die wesentlichen Fahrerassistenzsysteme auf, die in die Fahrzeugführung eingreifen. Eine kurze Beschreibung der Systeme ist im Glossar zu finden. In der Spalte „Umfeldsensorik“ ist angegeben, ob das Auslösen des Systems oder die Form des Eingriffs maßgeblich auf Umfelddaten beruhen. Zu den Umfelddaten gehören beispielsweise Abstände und Relativgeschwindigkeiten zu anderen Fahrzeugen und die Lage der Spurmarkierungen. ACC war bei seiner Markteinführung 1998 das erste Fahrerassistenzsystem, welches Umfelddaten benutzte. Die Systeme Heading Control und der Bremsassistent mit Radarerweiterung nutzen ebenfalls Umfelddaten und sollen den Fahrer – anders als ACC – auch in kritischen Situationen unterstützen. Die automatische Notbremsung stellt das erste Fahrerassistenzsystem dar, welches aufgrund von Umfeldinformationen ohne weiteres Zutun des Fahrers einen starken Eingriff in die Fahrzeugführung vornimmt. Durch diese Kombination von Eigenschaften grenzt sich die automatische Notbremsung von allen vorher eingeführten Fahrerassistenzsystemen ab.

---

<sup>(c)</sup>Die verfügbaren Systeme nutzen noch nicht die maximal mögliche Verzögerung.

	Jahr der Serieneinführung	Umfeldsensorik	Eingriff im fahrdynamischen Grenzbereich	Funktion ohne Fahrerreaktion	Ausrichtung des Systems
Tempomat	1958	nein	nein	ja	Komfort
ABS	1987	nein	ja	nein	Auswirkungen auf die aktive Sicherheit
ESP	1995	nein	ja	nein	Auswirkungen auf die aktive Sicherheit
Bremsassistent	1996	nein	ja	nein	Auswirkungen auf die aktive Sicherheit
ACC	1998	ja	nein	ja	Komfort
Heading Control	2001	ja	nein	ja	Auswirkungen auf die aktive Sicherheit
Bremsassistent mit Radarer- weiterung	2005	ja	ja	nein	Auswirkungen auf die aktive Sicherheit
Automatische Notbremsung	2006	ja	ja	ja	Reduktion der Unfallfolgen

Tabelle 2.2: Übersicht über die eingreifenden Fahrerassistenzsysteme

## 2.3 Sicherheitsgewinn und rechtliche Bewertung

Durch die automatische Notbremsung wird die Aufprallgeschwindigkeit bei einer Kollision reduziert. Selbst eine geringe Verminderung der Aufprallgeschwindigkeit kann die Überlebenswahrscheinlichkeit signifikant steigern. Busch prognostiziert, dass die Anzahl der jährlich im Straßenverkehr getöteten Personen beim flächendeckenden Einsatz einer Notbremsfunktion in Deutschland um 233 Personen sinken würde (Bus04). Dies entspricht einer Reduktion um 3,4% und stellt somit einen wesentlichen Sicherheitsgewinn dar.

Die durchschnittliche Verletzungsschwere und die Wahrscheinlichkeit, an den Folgen eines Unfalls zu sterben, hängen stark von der Differenzgeschwindigkeit beim Aufprall ab. Für verschiedene Situationen – beispielsweise „Fahrzeug kollidiert mit Fußgänger“ oder „Kollision zweier Fahrzeuge“ – liegen zahlreiche Veröffentlichungen vor, die diesen Zusammenhang quantitativ darstellen

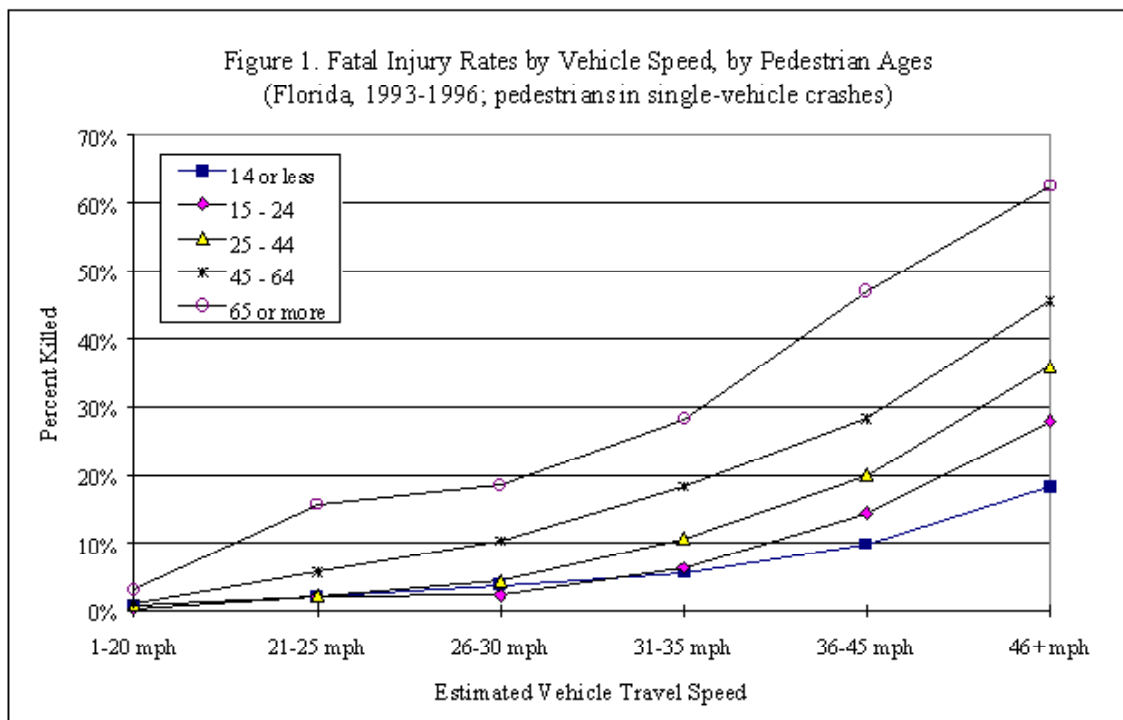


Abbildung 2.2: Wahrscheinlichkeit, an den Folgen einer Kollision zu sterben über der Fahrzeuggeschwindigkeit nach Preusser

(Bus04; AM01; LP99). Abbildung 2.2 zeigt diesen Zusammenhang für Fußgänger verschiedener Altersklassen. Es ist zu erkennen, dass auch eine kleine Verringerung der Differenzgeschwindigkeit – die in diesem Fall im Wesentlichen durch die Fahrzeuggeschwindigkeit gegeben ist – sich sehr positiv auf die Überlebenswahrscheinlichkeit auswirkt. Die Verringerung der Aufprallgeschwindigkeit führt stets zu einem Sicherheitsgewinn.

Das Wiener Übereinkommen von 1968 (Uni68, §8) schreibt vor, dass der Führer eines Kraftfahrzeugs stets die vollständige Kontrolle haben muss:

*Jeder Fahrzeugführer muss unter allen Umständen sein Fahrzeug beherrschen, um den Sorgfaltspflichten genügen zu können und um ständig in der Lage zu sein, alle ihm obliegenden Fahrbewegungen auszuführen.*

Scheinbar genügt die automatische Notbremsung nicht dem Wiener Übereinkommen, denn bei der Auslösung der Notbremsung führt das Fahrzeug selbständig und ohne Zutun des Fahrers eine Fahrbewegung aus. Der Fahrerwunsch nicht zu bremsen oder nicht so stark zu bremsen wird dabei überstimmt. Es ist aber zu diskutieren, ob aus der Tatsache, dass der Fahrer das Bremspedal nicht entsprechend betätigt geschlossen werden kann, dass der Fahrer keine Vollbremsung wünscht. Dabei sind zwei unterschiedliche Fälle zu unterscheiden:

- Der Fahrer hat die Verkehrssituation nicht wahrgenommen oder ihm ist bei der Interpretation der Verkehrssituation ein Fehler unterlaufen. Jeweils ist dem Fahrer nicht bewusst, dass eine Kollision eintreten wird. Eine automatische Notbremsung entspricht seinem zu unterstellenden Wunsch die Folgen einer Kollision zu minimieren.
- Der Fahrer hat die Absicht, eine Kollision herbeizuführen. Er missachtet somit vorsätzlich seine Sorgfaltspflichten. Die automatische Notbremsung entspricht dem vermutlichen Wunsch des Kollisionspartners und dieser ist höher zu bewerten als die verkehrsfeindliche Absicht des Fahrers.

In beiden Fällen erscheint die automatische Notbremsung als Sicherheitsgewinn für die Gesellschaft.

Die Querführung verbleibt während der Notbremsung beim Fahrer. Das ESP nimmt, wenn notwendig, die Bremsverzögerung zurück, um eine angeforderte Querbeschleunigung umzusetzen.<sup>(d)</sup> Diese Funktionsweise ist notwendig, damit die Verantwortung für die Auswahl des Aufschlagorts beim Fahrer verbleibt. Kleinste Veränderungen am Aufschlagort und dem Aufschlagwinkel können die Kollisionsdynamik und somit die Schwere der Verletzungen maßgeblich beeinflussen. Für eine Unterstützung des Fahrers bei der Wahl des Aufschlagorts wurde 1999 ein Patent erteilt(Kop99). Die technische Umsetzung erscheint aber zurzeit unmöglich.

Die Unvermeidbarkeit des Unfalls, der Verbleib der Querführung beim Fahrer und der zu erwartende Sicherheitsgewinn lassen eine mögliche Einschränkung des Wiener Übereinkommens gerechtfertigt erscheinen.

Eine Auslösung der automatischen Notbremsung in einer Situation, in der die Kollision noch abgewendet werden kann, stellt dagegen eine nicht zu rechtfertigende Verletzung des Wiener Übereinkommens und somit eine Fehlauslösung dar. Der Nutzen der automatischen Notbremsung wird wesentlich durch den Zwang zur Vermeidung von Fehlauslösungen dieser Art beschränkt.

Bewersdorf sieht massiv eingreifende Assistenzsysteme wie die automatische Notbremsung nicht im Widerspruch zum Wiener Übereinkommen. Weiter ergäben sich nicht notwendig Konflikte bezüglich der Staatshaftung, der Produkthaftung, der Halter- und Fahrerhaftung und des Zulassungsrechts(Bew05). Ob sich diese Standpunkte in der Rechtsprechung durchsetzen, ist derzeit offen.

Ich denke, dass Systeme, die den Fahrer gegebenenfalls auch überstimmen können, einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit leisten werden. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen sollten einen Sicherheitsgewinn nicht verhindern und müssten eventuell angepasst werden.

---

<sup>(d)</sup>Die verfügbaren automatischen Notbremssysteme reagieren im Fall eines Lenkeingriffs, indem sie die Notbremsung vollständig abbrechen.

### 2.4 Verfügbare Systeme

Bisher bieten drei Fahrzeughersteller automatische Notbremssysteme für Personenkraftwagen an. Alle Systeme nutzen – teils exklusiv – Radarsensoren. Über die verwendeten Auslösekriterien ist wenig bekannt. Dies ist verständlich, da die Wahl und die Parametrisierung des Auslösekriteriums darüber entscheiden, wo ein Notbremssystem zwischen möglichst großem Nutzen und der Vermeidung von Fehlauslösungen einzuordnen ist.

**Daimler** Im Jahr 2006 hat Daimler die sogenannte „Pre-Safe-Bremse“ für die S-Klasse und die CL-Klasse eingeführt. Das System wird ausschließlich in Kombination mit einem Bremsassistenten angeboten.

Als Sensoren kommen zwei Nahbereichsradare und ein Fernbereichsradar zum Einsatz. Die Funktion wird nur bei Geschwindigkeiten zwischen  $30 \frac{km}{h}$  und  $180 \frac{km}{h}$  zur Verfügung gestellt. Das System ist auf die Erkennung von fahrenden Fahrzeugen ausgelegt.

Die „Pre-Safe-Bremse“ ist immer aktiv und greift gegebenenfalls mit einer Teilbremsung<sup>(e)</sup> ein. Sobald erkannt wird, dass der Fahrer einen Lenkeingriff vornimmt, bricht das System die Teilbremsung ab.

**Toyota** Im Frühjahr 2007 hat Toyota das sogenannte „PCS, Pre Crash Safety System“ für den Lexus LS460 eingeführt. Eine Teilfunktion des PCS ist eine automatische Notbremsung.

Als Sensoren kommen ein Fernbereichsradar und eine Infrarot-Stereo-Kamera zum Einsatz. Das System reagiert sowohl auf Fahrzeuge als auch auf Personen, Tiere und stehende Objekte. Im Bedarfsfall wird eine Teilbremsung ausgelöst.

**Honda** Honda bietet für die Baureihen CR-V und Legend das System „CMBS, Collision Mitigation Brake System“ an. Das System enthält die Funktionen eines Bremsassistenten und einer automatischen Notbremsung.

Als Sensor kommt ein Fernbereichsradar zum Einsatz. Es wird sowohl auf stehende als auch auf bewegte Hindernisse reagiert. Gegebenenfalls wird eine Teilbremsung ausgelöst. Bei Lenkeingriffen deaktiviert sich das System.

**Volvo** Volvo hat für das Frühjahr 2009 eine automatische Notbremsfunktion für das Modell XC90 angekündigt. Das System soll ausschließlich im Geschwindigkeitsbereich unter  $30 \frac{km}{h}$  eingreifen. Als Sensor soll ein Nahbereichsradar zum Einsatz kommen.

---

<sup>(e)</sup> Als Teilbremsung wird ein Bremsmanöver bezeichnet, bei dem die Verzögerung kleiner als die maximal mögliche Verzögerung ist.

Alle bereits verfügbaren automatischen Notbremssysteme werden in Kombination mit einem Bremsassistenten als Zusatzausstattung angeboten. Sie führen lediglich Teilbremsungen durch. Die vollständige Bremsleistung wird erst dann zur Verfügung gestellt, wenn der Fahrer bremst und damit den geschärften Bremsassistenten aktiviert. Laut Knoll und Schäfer wird in mehr als der Hälfte aller Unfälle kaum oder gar nicht<sup>(f)</sup> gebremst (Kno07; Sch04). Die Hauptursache dafür ist Unachtsamkeit. In diesen Fällen stellt die Auslösung einer Teilbremsung einen großen Vorteil dar. Allerdings wird in weiteren 45% der Fälle aufgrund von Unerfahrenheit nur eine Teilbremsung<sup>(g)</sup> vom Fahrer ausgeführt. In diesen Fällen bewirken die aktuellen Notbremssysteme nur wenig. Erst eine automatische Notbremsung, die eine Vollbremsung auslöst, wird hier zu Verbesserungen führen.

## 2.5 Auslösekriterien

In diesem Abschnitt werden zunächst die verschiedenen Verfahren präsentiert, die zur Vorhersage einer unvermeidbar eintretenden Kollision vorgeschlagen werden. Dabei wird hypothetisch davon ausgegangen, dass geeignete Sensoren zusammen mit einer Sensordatenfusion ein perfektes Abbild der Umwelt erstellt haben. Der Einfluss von Messunsicherheiten wird nicht berücksichtigt.

Eindimensionale Verfahren, die ausschließlich die Längsdynamik berücksichtigen, werden nicht betrachtet, weil sie nicht sicher voraussagen können, ob eine Kollision auch bei Lenkeingriffen eintritt. Zu den eindimensionalen Verfahren gehören die Auswertung der Zeit bis zur Kollision  $t_{tc}$ <sup>(h)</sup> und die Auswertung der Zeitlücke  $t_g$ <sup>(i)</sup>. Es besteht zwar ein Zusammenhang zwischen diesen Größen und der empirischen Kollisionswahrscheinlichkeit (MBP05) – eine sichere Vorhersage einer Kollision für eine spezielle Verkehrssituation ist aber nicht möglich, da das Ausweichen gänzlich unberücksichtigt bleibt.

Eindimensionale Verfahren sind somit nicht zur Auslösung einer automatischen Notbremsung geeignet. Die im Folgenden beschriebenen zweidimensionalen Auslösekriterien berücksichtigen längs- und querdynamische Manöver zur Kollisionsvermeidung.

### 2.5.1 Auslösekriterium nach Kopischke

Das Auslösekriterium von Kopischke prüft, ob das Ego-Fahrzeug durch Ausweichen nach links oder rechts oder durch Bremsen eine Kollision mit einem Hindernis vermeiden kann (Kop00). Sobald ein Hindernis erkannt wird, mit dem die Kollision weder durch Ausweichen noch durch Bremsen verhindert werden kann, wird die Notbremsung ausgelöst. Abbildung 2.3 zeigt das Ego-Fahrzeug, ein Hindernis und die drei betrachteten Trajektorien. Die Trajektorien zeigen den Verlauf

<sup>(f)</sup>Verzögerungen zwischen  $0 \frac{m}{s^2}$  und  $2 \frac{m}{s^2}$

<sup>(g)</sup>Verzögerungen zwischen  $2 \frac{m}{s^2}$  und  $8 \frac{m}{s^2}$

<sup>(h)</sup>time to collision

<sup>(i)</sup>time gap

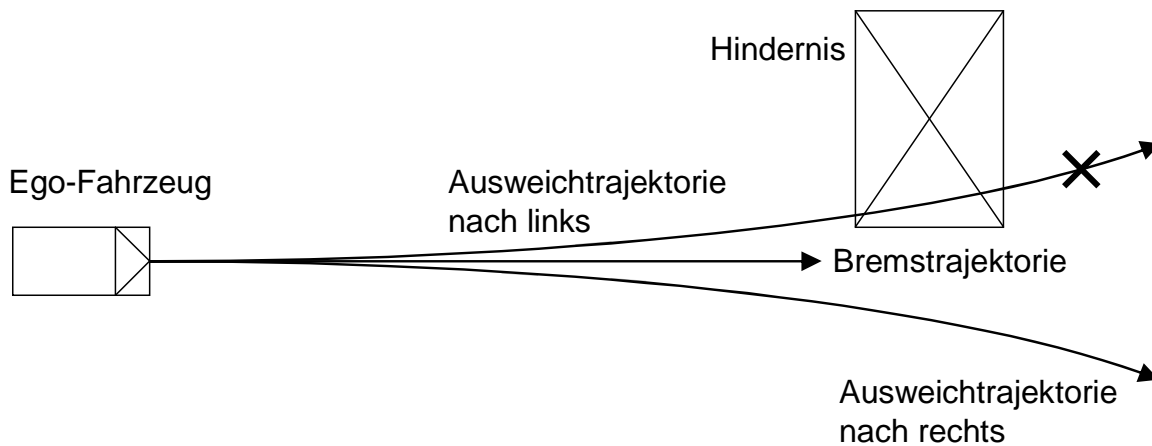


Abbildung 2.3: Auslösekriterium nach Kopischke

des Fahrzeugschwerpunkts. Das Hindernis ist um die halbe Fahrzeugbreite verbreitert worden. Beim Ausweichen nach links würde das Ego-Fahrzeug mit dem Hindernis kollidieren – die entsprechende Trajektorie ist mit einem Kreuz gekennzeichnet. Im dargestellten Fall würde eine Notbremsung nicht ausgelöst werden, weil nur eine der Trajektorien zur Kollision führen würde.

Das Verfahren von Kopischke hat die folgenden Einschränkungen: Die berechneten Ausweichtrajektorien gehen zwar weit über die von Lages vorgeschlagenen kreisförmigen Ausweichbahnen (Lag00) hinaus, die Fahrzeugdynamik wird bei der Berechnung der Trajektorien jedoch nicht berücksichtigt. Insbesondere fließt der aktuelle fahrdynamische Zustand des Ego-Fahrzeugs nicht ausreichend in die Berechnung ein. Situationen mit mehr als einem Hindernis werden als Folge von Situationen mit jeweils nur einem einzigen Hindernis behandelt. Wird der Unfall nur durch die gleichzeitige Anwesenheit mehrerer Hindernisse unvermeidbar, so wird dies nicht erkannt. Das Verfahren ist ausschließlich auf stationäre Hindernisse anwendbar.

**Verbesserungspotential:** Die Qualität und die Anzahl der betrachteten Trajektorien kann erhöht werden. Busch hat diese Verbesserungen vorgenommen.

### 2.5.2 Auslösekriterium nach Busch

Busch berechnet für jedes beteiligte Fahrzeug sechs mögliche Trajektorien mit Hilfe eines Fahrzeugmodells (Bus04). Es wird eine numerische Fahrzeugsimulation verwendet, welche die Dynamik der Fahrzeuge berücksichtigt und in welche die potentielle Reaktion des Fahrers eingeht. Gegenüber Kopischke ergeben sich damit realistischere Trajektorien. Die nachgebildeten Manöver sind:

- Ausweichen nach links
- Ausweichen nach rechts



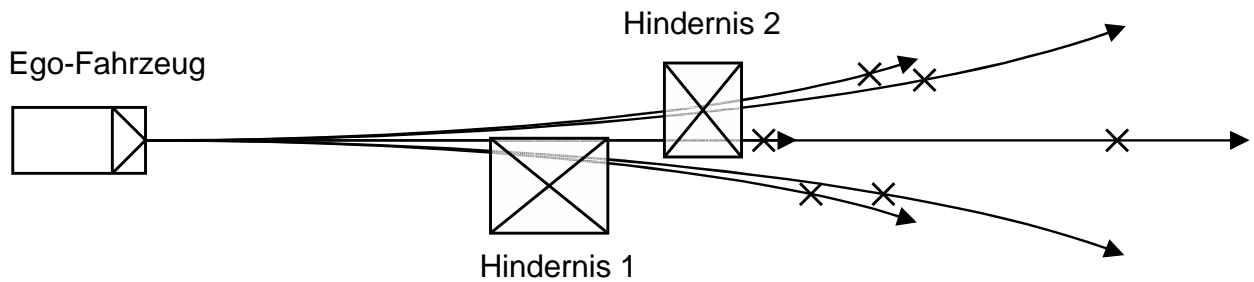


Abbildung 2.4: Auslösekriterium nach Busch

- Beschleunigen
- Verzögern
- Verzögern und Ausweichen nach links
- Verzögern und Ausweichen nach rechts

Es wird geprüft, welche Kombinationen dieser Trajektorien zur Kollision führen. Gibt es ein Fahrzeug, mit dem das Ego-Fahrzeug unabhängig von der Wahl der Trajektorien kollidiert, so wird die Notbremsung ausgelöst. Für jedes Fremdfahrzeug müssen dazu 36 Paare von Trajektorien untersucht werden. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass eine Notbremsung nur dann erfolgt, wenn auch kooperatives Verhalten des Kollisionspartners die Kollision nicht verhindern kann.

Trotz der Berücksichtigung der Fahrzeugdynamik und der Beachtung bewegter Hindernisse hat auch dieses Verfahren Einschränkungen: Ebenso wie das Verfahren von Kopischke erkennt das Verfahren von Busch nicht, wenn eine Kollision durch die gleichzeitige Anwesenheit mehrerer Hindernisse unvermeidbar ist. Abbildung 2.4 zeigt eine Situation mit zwei Hindernissen und die sechs berücksichtigten Trajektorien<sup>(j)</sup>. Ein Teil der Trajektorien führt nur mit dem ersten Hindernis zur Kollision, ein anderer Teil nur mit dem zweiten. Obwohl die Kollision unvermeidbar ist, wird die automatische Notbremsung nicht ausgelöst, weil es kein einzelnes Hindernis gibt, mit dem die sechs Trajektorien zur Kollision führen. Mit dem Verfahren von Busch kann nicht ausgeschlossen werden, dass es eine Trajektorie zwischen den Hindernissen hindurch gibt.

Die Verfahren von Kopischke und Busch können nur dann eine Kollision erkennen, wenn alle betrachteten Trajektorien mit dem gleichen, konvexen Hindernissobjekt<sup>(k)</sup> zur Kollision führen. In diesem Fall kann aus der Aussage, dass alle betrachteten Trajektorien zur Kollision führen, geschlossen werden, dass auch alle nicht betrachteten Trajektorien zur Kollision führen.

<sup>(j)</sup>Die „Bremstrajektorie“ ist schwer zu erkennen, weil sie von der „Beschleunigungstrajektorie“ verdeckt wird.

<sup>(k)</sup>Die Forderung, dass die Hindernisse konvex sein müssen, schließt „Einbuchtungen“ im Hindernis aus.

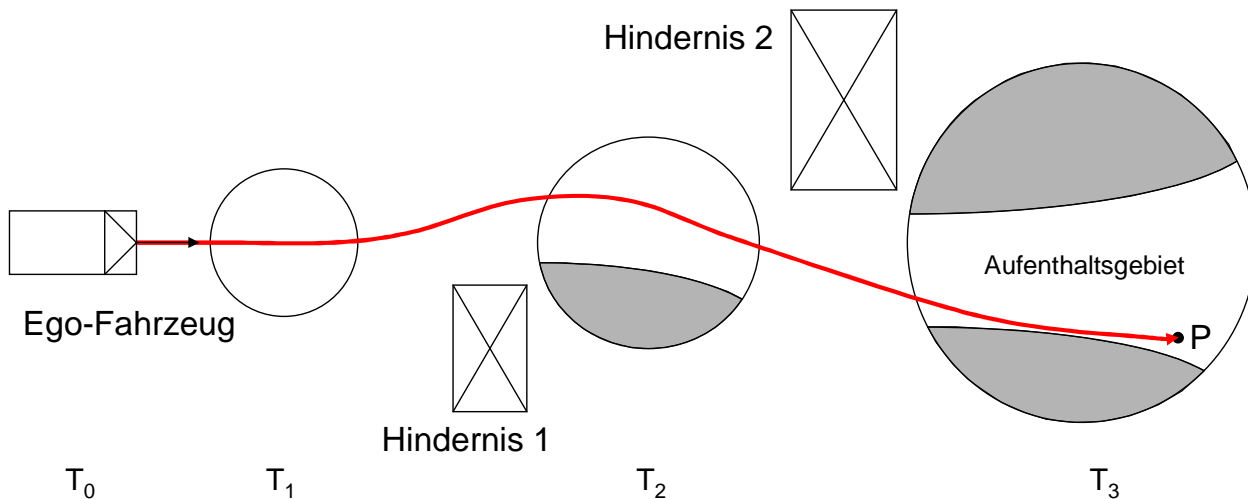


Abbildung 2.5: Verfolgung von Aufenthaltsgebieten

**Verbesserungspotential:** Der größte Nachteil am Verfahren von Busch ist, dass es nur mit einzelnen Hindernissen umgehen kann. Um mehrere Hindernisse zu berücksichtigen, müsste die Anzahl der Bahnen drastisch erhöht werden. Die Berechnung würde entsprechend länger dauern.

### 2.5.3 Verfolgung von Aufenthaltsgebieten

Dieses Verfahren verfolgt keine einzelnen Trajektorien – stattdessen wird das Gebiet verfolgt, in dem sich das Fahrzeug befinden kann. Als konservative Abschätzung wird angenommen, dass das Fahrzeug bis an die Kraftschlussgrenze in alle Richtungen beschleunigen kann. Die maximale Länge der auftretenden Beschleunigungsvektoren ist also durch eine vorgegebene Größe  $a_{VA}$  beschränkt. Der Längs- und der Querruck werden dabei nicht beschränkt. Nach einer Zeitspanne  $T_i$  kann der Schwerpunkt des Fahrzeugs unter dieser Annahme ein gewisses Gebiet nicht verlassen. Dieses Aufenthaltsgebiet hat die Form eines Kreises. Geraten Hindernisse in das Aufenthaltsgebiet, so wird es entsprechend verkleinert. Zu jedem Punkt, der sich schließlich im Aufenthaltsgebiet befindet, gehört mindestens eine kollisionsfreie Trajektorie, die in genau diesem Punkt endet. Ob diese Trajektorie vom Fahrzeug realisiert werden kann, wird nicht garantiert. Ist das Aufenthaltsgebiet aber eine leere Menge, so folgt daraus, dass es keine Trajektorie gibt, welche die Kollision verhindern kann. Das Verfahren berücksichtigt die Dynamik des Ego-Fahrzeugs nur sehr vereinfacht. Lediglich der Betrag – nicht aber die Richtung – des Beschleunigungsvektors ist eingeschränkt. In Abbildung 2.5 wird gezeigt, wie zuerst Hindernis 1 und dann Hindernis 2 das weiße Aufenthaltsgebiet verkleinern. Die grau markierten Gebiete könnten nur dann vom Ego-Fahrzeug erreicht werden, wenn die Hindernisse nicht vorhanden wären. Im Punkt P enden unendlich viele kollisionsfreie Trajektorien. Eine davon ist rot eingezeichnet. In der dargestellten Situation würde die automatische Notbremsung nicht ausgelöst.

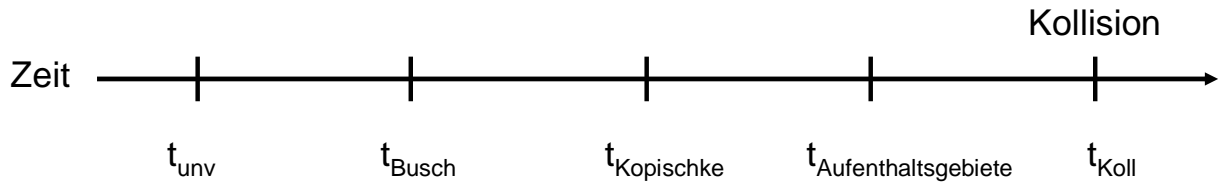


Abbildung 2.6: Zeitliche Abfolge der Kollisionserkennung bei einem Hindernis

Im Gegensatz zu den Verfahren von Busch und Kopischke können Situationen mit mehreren Hindernissen besser bewertet werden. Wenn die gleichzeitige Anwesenheit mehrerer Hindernisse die Kollision unvermeidbar macht, so ist es möglich, dass eine Kollision früher als mit den anderen Verfahren erkannt wird. In vielen Fällen wird aber die großzügig überschätzte Dynamik des Ego-Fahrzeugs die frühzeitige Erkennung verhindern.

**Verbesserungspotential:** Der größte Nachteil am Verfahren der Verfolgung von Aufenthaltsgebieten ist, dass die Fahrzeugdynamik nur unzureichend berücksichtigt wird. Dieses Problem lässt sich innerhalb des Verfahrens lösen, indem der Merkmalsraum, in dem sich das Aufenthaltsgebiet bewegt, erweitert wird. Ein Punkt im Aufenthaltsgebiet würde dann nicht allein durch seine Position festgelegt, sondern durch die Position, den Gierwinkel, die Gierrate, den Schwimmwinkel, den Lenkwinkel und die Längsbeschleunigung. Die Art und Weise, mit der die Aufenthaltsgebiete in die Zukunft prädiziert werden, wäre aufwendig und die Berechnungen dauerten entsprechend lange.

#### 2.5.4 Vergleich der Auslösekriterien

Hier werden die drei beschriebenen Kriterien zur Auslösung einer automatischen Notbremsung miteinander verglichen. Insbesondere wird gezeigt, in welcher zeitlichen Reihenfolge eine künftige Kollision erkannt wird. Es werden getrennte Betrachtungen für Situationen mit einem und mit mehreren relevanten Hindernissen vorgenommen. Als Ausgangslage dient jeweils eine Situation, in der eine Kollision seit dem Zeitpunkt  $t_{unv}$  unvermeidbar ist. Zum Zeitpunkt  $t_{Koll}$  tritt die Kollision ein.

**Situationen mit einem Hindernis** Bei der Verfolgung von Aufenthaltsgebieten werden Trajektorien mit unendlichem Ruck zugelassen. Bei der Annäherung an ein stationäres Hindernis ermöglichen diese Bahnen länger ein Ausweichen als die Trajektorien von Kopischke und Busch. Dementsprechend wird die Kollision später als bei Kopischke und Busch erkannt. Die Bahnen von Busch beschreiben die Dynamik des Fahrzeugs besser als die von Kopischke. Die Bahnen von

Kopischke ermöglichen stärkere Ausweichmanöver, das entsprechende Verfahren erkennt Kollisionen später als das von Busch. Abbildung 2.6 zeigt qualitativ die Auslösezeitpunkte der verschiedenen Verfahren für Situationen mit einem Hindernis.

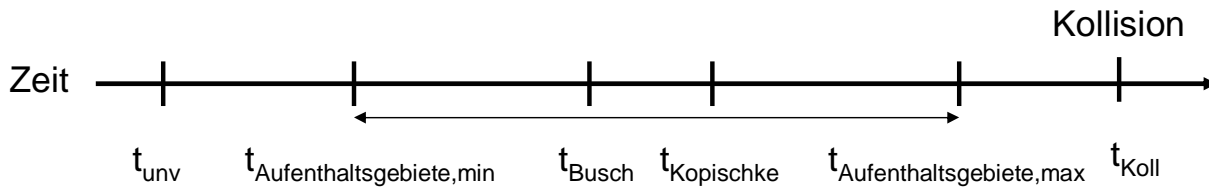


Abbildung 2.7: Zeitliche Abfolge der Kollisionserkennung bei mehr als einem Hindernis

**Situationen mit mehreren Hindernissen** Ist die Kollision unvermeidbar, weil mehrere Hindernisse involviert sind, so ist es möglich, dass das Verfahren der Verfolgung von Aufenthaltsgebieten dies zuerst erkennt. Weil die dabei betrachteten Trajektorien aber sehr extreme Manöver erlauben, ist es genauso möglich, dass das Verfahren von Busch oder sogar das von Kopischke die unvermeidbare Kollision früher erkennt als das Verfahren der Verfolgung von Aufenthaltsgebieten. Abbildung 2.7 zeigt die zeitliche Abfolge der Auslösezeitpunkte in Situationen mit mehreren Hindernissen.

### 2.5.5 Zusammenfassung der Auslösekriterien nach dem Stand der Technik

Das Verfahren von Busch ist dem Verfahren von Kopischke sowohl in Situationen mit einem als auch in solchen mit mehreren Hindernissen überlegen. Mit ihm kann eine unvermeidbare Kollision jeweils früher erkannt werden. Das Verfahren der Verfolgung von Aufenthaltsgebieten kann in günstigen Fällen mit mehreren Hindernissen eine unvermeidbare Kollision früher als das Verfahren von Busch erkennen. Dies kann aber nicht garantiert werden – eventuell wird die Kollision sogar später als beim Verfahren von Kopischke erkannt. Die Verfahren haben nur noch ein begrenztes Verbesserungspotential. Weil sie aber keine Fehlauslösungen produzieren, sind alle Verfahren geeignet, eine Notbremsung auszulösen. Der Sicherheitsgewinn fällt jedoch unterschiedlich groß aus. Die Tabelle 2.3 zeigt eine Übersicht der Stärken und Schwächen der drei analysierten Auslösekriterien.

Die Verfahren nach dem Stand der Technik können entweder nicht mit Situationen umgehen, in denen mehrere Objekte betrachtet werden müssen, oder sie berücksichtigen die Dynamik des Ego-Fahrzeugs nur unzureichend. Ein verbessertes System zur Erkennung unvermeidbar eintretender Kollisionen

muss, so wie das Verfahren der Verfolgung von Aufenthaltsgebieten, mit mehreren Hindernissen umgehen können. Es muss aber, ähnlich wie das Verfahren von Busch, die Dynamik des Ego-Fahrzeugs berücksichtigen.

	Kopischke	Busch	Aufenthaltsgebiete
realitätsnahe Trajektorien	o	++	--
statische Hindernisse	+	++	o
bewegtes Hindernis	–	++	o
Echtzeitfähigkeit	++	–	o
Mehrhindernisfähigkeit	–	–	+
Zeitpunkt der Auslösung (ein Hindernis)	–	++	–
Zeitpunkt der Auslösung (mehrere Hindernisse)	–	–	o
Fehlauslösungen	++	++	++

Tabelle 2.3: Übersicht über die Auslösekriterien für eine automatische Notbremsung



### 3 Methode und Thesen

Wie im vorigen Kapitel gezeigt, sind die Auslösekriterien nach dem Stand der Technik nicht zufriedenstellend. Sie lösen eine automatische Notbremsung in einigen Fällen zu spät aus und reduzieren dadurch den Sicherheitsgewinn der automatischen Notbremsung.

Ziel

*Es soll ein Auslösekriterium entwickelt werden, das unvermeidbare Kollisionen früher als die gängigen Verfahren erkennt. Insbesondere sollen Situationen mit mehreren Hindernissen besser interpretiert werden.*

Da in Kapitel 2 auch gezeigt wurde, dass die untersuchten Verfahren nicht wesentlich verbessert werden können, wird hier ein gänzlich anderes Verfahren vorgestellt: Die Situationsbewertung mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien. Abbildung 3.1 zeigt den Ablauf als Blockschaltbild. Nachdem die Verkehrssituation mit Hilfe von Sensoren und einer Sensordatenfusion erfasst wurde, wird eine spezielle Trajektorie – die sogenannte Stellvertretertrajektorie – berechnet. Eine Stellvertretertrajektorie ist unter allen kollisionsfreien Trajektorien eine, die bei minimalem Reibbeiwert realisiert werden kann. In einem zweiten Schritt wird eine Kenngröße der berechneten Stellvertretertrajektorie zur Bewertung der Verkehrssituation genutzt. Überschreitet diese Kenngröße einen Schwellwert, so wird auf eine unvermeidbar eintretende Kollision geschlossen und die automatische Notbremsung ausgelöst.

In den folgenden Abschnitten wird das Verfahren noch einmal präzise formuliert. Die Stellvertretertrajektorie und die Situationsbewertung mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien werden definiert und anhand von Beispielen veranschaulicht. Zum Schluss des Kapitels werden drei Thesen formuliert, die für das vorgestellte Verfahren überprüft werden sollen.

#### 3.1 Stellvertretertrajektorie

##### 3.1.1 Definition

*Eine Stellvertretertrajektorie ist eine kollisionsfreie Trajektorie, deren längster Beschleunigungsvektor minimale Länge hat.*

Im Folgenden wird diese eher komplizierte Definition konkretisiert. Dazu wird unter anderem festgelegt, was genau unter der minimale Länge eines längsten Beschleunigungsvektors zu verstehen ist. An die formale Definition der Stellvertretertrajektorie schließt sich ein Beispiel an.

Mit einer Trajektorie wird die Veränderung des Fahrzeugschwerpunkts beschrieben. Jede ebene Trajektorie kann durch zwei zeitabhängige Funktionen – eine für die X-Komponente und eine für die Y-Komponente – beschrieben

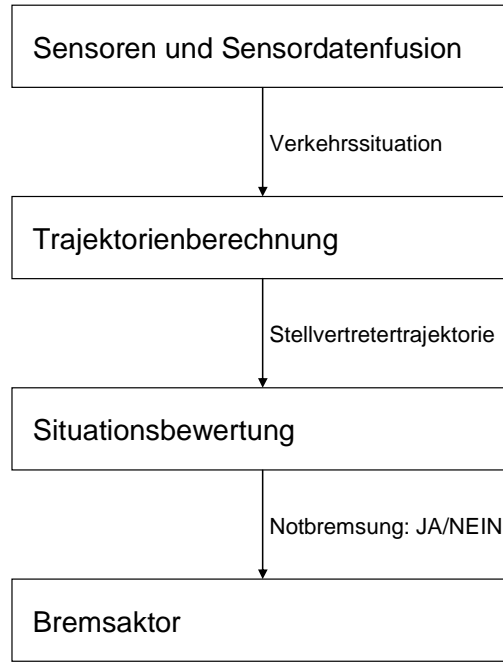


Abbildung 3.1: Funktionsweise der Situationsbewertung mit Stellvertreertrajektorien

werden. Um Konflikte mit der späteren Nomenklatur zu vermeiden, werden diese Funktionen mit  $x_1$  und  $x_2$  bezeichnet. Da die Schwerpunktposition nur in einem Zeitintervall  $[t_0, t_f]$  betrachtet wird, haben die beiden Funktionen die Form  $x_1, x_2 : [t_0, t_f] \rightarrow \mathbb{R}$ .

Zu jedem Zeitpunkt  $t$  kann der Beschleunigungsvektor mit

$$a(t) = \begin{pmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \end{pmatrix}$$

bestimmt werden. Die Länge des Beschleunigungsvektors – oder auch die Gesamtbeschleunigung – ist

$$\|a(t)\| = \sqrt{(\ddot{x}_1(t))^2 + (\ddot{x}_2(t))^2} .$$

Es ist möglich, für jede gegebene Trajektorie die Länge ihres längsten Beschleunigungsvektors zu bestimmen. Die Abbildung, die einer Trajektorie diese maximale Länge zuordnet, wird als Qualitätsfunktional<sup>(a)</sup> definiert:

**Definition 1 (Qualitätsfunktional)**

*Sei eine Trajektorie in Form zweier Funktion  $x_1, x_2 : [t_0, t_f] \rightarrow \mathbb{R}$  gegeben, dann ist das Qualitätsfunktional  $F$  festgelegt mit*

$$F(x_1, x_2) := \max_{t \in [t_0, t_f]} \sqrt{(\ddot{x}_1(t))^2 + (\ddot{x}_2(t))^2} .$$

---

<sup>(a)</sup> Als Funktionale werden Abbildungen bezeichnet, deren Argumente Funktionen sind.



Eine Stellvertretertrajektorie wird bezüglich einer Verkehrssituation definiert. Die Verkehrssituation wird dabei mit  $\mathcal{V}$  bezeichnet. Zur Verkehrssituation gehören alle mobilen und stationären Hindernisse sowie der fahrdynamische Zustand des Ego-Fahrzeugs. Nicht zur Verkehrssituation gehören hingegen Fahrspurmarkierungen und Verkehrszeichen, da sie zur Kollisionsvermeidung eventuell ignoriert werden dürfen.

**Definition 2** (Menge der kollisionsfreien Trajektorien,  $\mathcal{M}_{\mathcal{V}}$ )

*Die Menge aller fahrdynamisch realisierbaren Trajektorien, die in der Verkehrssituation  $\mathcal{V}$  nicht zu einer Kollision führen, wird mit  $\mathcal{M}_{\mathcal{V}}$  bezeichnet.*

Die Elemente vom  $\mathcal{M}_{\mathcal{V}}$  sind Zwei-Tupel von Funktionen. Falls es keine kollisionsfreie Trajektorie gibt, so ist  $\mathcal{M}_{\mathcal{V}}$  die leere Menge. Falls  $\mathcal{M}_{\mathcal{V}}$  jedoch nicht leer ist, so enthält sie eine Trajektorie, für die das Qualitätsfunktional einen minimalen Wert annimmt. Eine solche Trajektorie vertritt in Bezug auf die erreichbare Qualität alle kollisionsfreien Trajektorien und wird daher als Stellvertretertrajektorie bezeichnet.

**Definition 3** (Stellvertretertrajektorie)

*Für eine gegebene Verkehrssituation  $\mathcal{V}$  ist  $(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2) \in \mathcal{M}_{\mathcal{V}}$  genau dann eine Stellvertretertrajektorie, wenn*

$$F(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2) \leq F(x_1, x_2) \text{ für alle } (x_1, x_2) \in \mathcal{M}_{\mathcal{V}}$$

*gilt.*

Eine Stellvertretertrajektorie ist optimal bezüglich des Qualitätsfunktionals  $F$ . Sie wird aber bewusst nicht „optimale Trajektorie“ genannt, da diese Benennung stets die zusätzliche Angabe darüber benötigt, bezüglich welchen Kriteriums die Trajektorie optimal ist. Für andere Anwendungen sind andere Kriterien denkbar, die beispielsweise die Lenkrate, das Lenkmoment, die Gierrate oder den Schwimmwinkel berücksichtigen. Für die Berechnung von Trajektorien, mit denen eine Fahraufgabe möglichst schnell bewältigt werden kann, wird die Zeitdauer als Kriterium gewählt (GKMBS08).

Obwohl in den folgenden Veranschaulichungen stets ein einzelnes, stationäres Hindernis berücksichtigt wird, gelten die obigen Definitionen allgemein: Auch in Situationen mit mehreren und mobilen Hindernissen können Stellvertretertrajektorien bestimmt werden. Die numerischen Verfahren sind in diesem Fall jedoch deutlich aufwendiger. An der Art, in der eine Stellvertretertrajektorie zur Bewertung einer Verkehrssituation genutzt werden kann, ändert sich jedoch nichts.

### 3.1.2 Veranschaulichung

Zunächst wird anhand eines Beispiels aufgezeigt, dass das Qualitätsfunktional zwei Trajektorien hinsichtlich ihrer Eignung zur Kollisionsvermeidung sinnvoll trennt. Anschließend wird am selben Beispiel eine Stellvertretertrajektorie dargestellt.

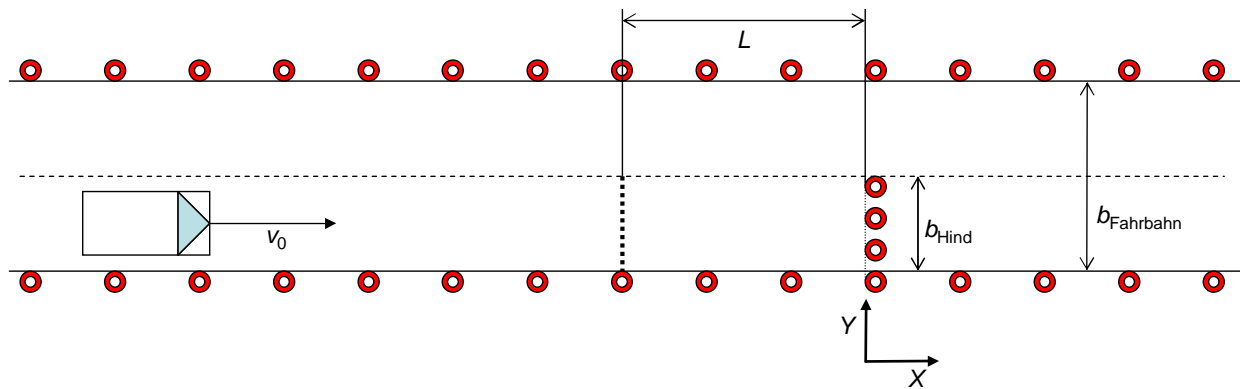


Abbildung 3.2: Versuchsanordnung

### 3.1.2.1 Veranschaulichung des Qualitätsfunktionalis

In einem Vorversuch sollten zwei Probanden eine identische Verkehrssituation bewältigen. Beiden ist eine kollisionsfreie Fahrt gelungen, jedoch sind die von ihnen gewählten Trajektorien sehr unterschiedlich, sodass die Frage aufgeworfen wird, welche Trajektorie „ungefährlicher“ und damit „besser“ ist.

Die zwei Versuchspersonen fahren nacheinander mittig auf der rechten Spur einer zweispurigen Landstraße (Abbildung 3.2). Vor dem Fahrzeug befindet sich ein stehendes Hindernis, welches die rechte Fahrspur blockiert. Die Fahrbahn-ränder und das Hindernis sind mit Pylonen markiert. Die Anfahrtsgeschwindigkeit wird mit  $v_0$  bezeichnet. Die Breite der Fahrbahn  $b_{Fahrbahn}$  und die des Hindernisses  $b_{Hind}$  waren für beide Probanden jeweils gleich. Sobald der Soll-Auslöseabstand  $L$  zum Hindernis unterschritten wird, erhalten die Probanden ein akustisches Signal und beginnen daraufhin mit kollisionsvermeidenden Maßnahmen wie Lenken und Bremsen. Die Probanden reagieren erst nach einer gewissen Reaktionszeit. Die Position des Fahrzeugs zum Zeitpunkt der ersten messbaren Reaktion der Testperson wird mit  $(x_0, y_0)$  bezeichnet. Da die Straße parallel zur  $X$ -Achse verläuft und der Mittelpunkt des Hindernisses im Ursprung des Koordinatensystems liegt, ergibt sich der Ist-Auslöseabstand zum Hindernis von  $L_0 = -x_0 - l_v$ , wobei  $l_v$  der Abstand zwischen Schwerpunkt und Fahrzeugfront ist. Ferner ergibt sich durch die Festlegung des Koordinatensystems, dass  $y_0$  dem Abstand des Fahrzeugschwerpunkts vom rechten Straßenrand entspricht. Die weiteren fahrdynamischen Größen zum Zeitpunkt der ersten Reaktion werden mit

	$v_0$	$L_0$	$y_0$	$\psi_0$	$\dot{\psi}_0$
Versuchsperson 1	$27,80 \frac{m}{s}$	$27,23m$	$1,83m$	$0,198^\circ$	$-0,418 \frac{^\circ}{s}$
Versuchsperson 2	$27,82 \frac{m}{s}$	$27,30m$	$1,85m$	$0,330^\circ$	$-0,380 \frac{^\circ}{s}$

Tabelle 3.1: Messgrößen zu Beginn des Eingriffs durch die Testpersonen

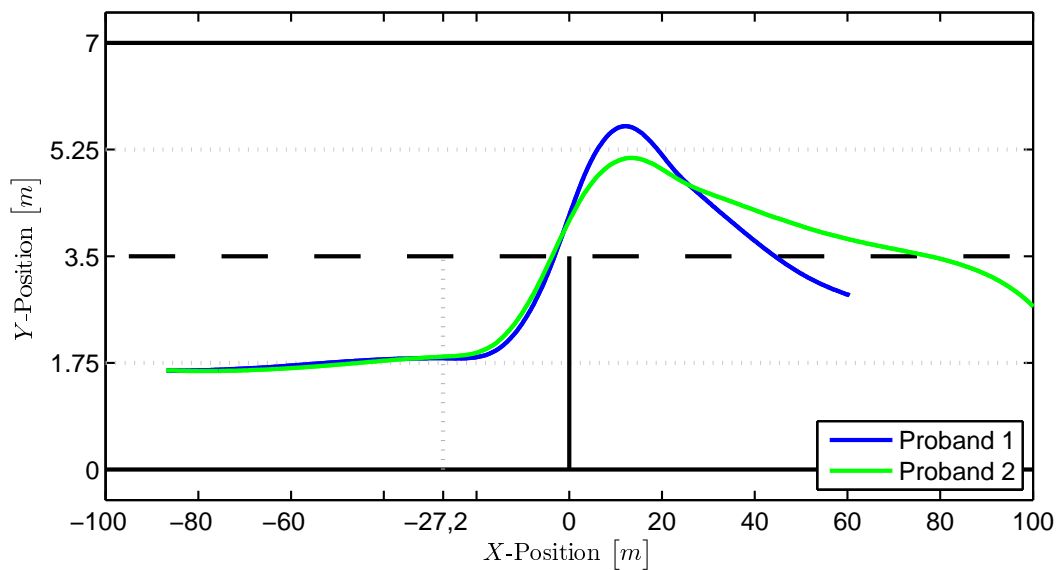


Abbildung 3.3: Trajektorien der Versuchspersonen in der Draufsicht

Geschwindigkeit  $v_0$ , Gierwinkel  $\psi_0$  und Gierrate  $\dot{\psi}_0$  angegeben.

Die Werte der verschiedenen Größen sind in Tabelle 3.1 angegeben. Mit der verwendeten Messtechnik sind die Werte für die Position und die Geschwindigkeit kaum zu unterscheiden. Die Differenzen der Gierwinkel und -raten sind vernachlässigbar klein. Die Bedingungen, welche die beiden Testpersonen beim Beginn ihrer Handlung vorgefunden haben, können daher als gleich angenommen werden. Trotzdem haben die beiden Probanden sehr unterschiedliche Lösungsmethoden gewählt: Die erste Testperson leitet sofort nach der Übergabe eine starke Bremsung ein und weicht gleichzeitig aus. Die zweite Testperson bremst nicht und löst die Aufgabe ausschließlich mit einem Lenkmanöver. Die folgenden Abbildungen stellen die beiden Lösungsmethoden dar.

In Abbildung 3.3 sind die Trajektorien der beiden Fahrzeuge in der Draufsicht dargestellt. Es sind die Positionen der Schwerpunkte der Fahrzeuge eingezeichnet. Zu beachten ist, dass die Achsen unterschiedlich skaliert sind, was insbesondere zu einer verfälschten Darstellung des Kurswinkels führt. Weiterhin ist der zeitliche Verlauf der Manöver aus dieser Art der Darstellung nicht ersichtlich. Der zweite Proband nutzt nach der Passage des Hindernisses weniger Raum auf der linken Fahrbahn. Ferner ist zu erkennen, dass der erste Proband während der für beide Probanden identischen Aufzeichnungsdauer eine geringere Strecke zurückgelegt hat.

Abbildung 3.4 zeigt den zeitlichen Verlauf der X- und Y-Beschleunigung. Aufgrund der kleinen Gierwinkel weichen sie nur geringfügig von der Längs- und Querbeschleunigung ab. Beide Probanden bringen ungefähr die gleiche Querbeschleunigung auf. Der erste Proband hält die maximale Querbeschleunigung in positive Y-Richtung etwas länger aufrecht. Während der erste Proband mit Beginn seiner Lenkreaktion zusätzlich stark bremst, hält der zweite Proband die Geschwindigkeit und weicht nur aus.

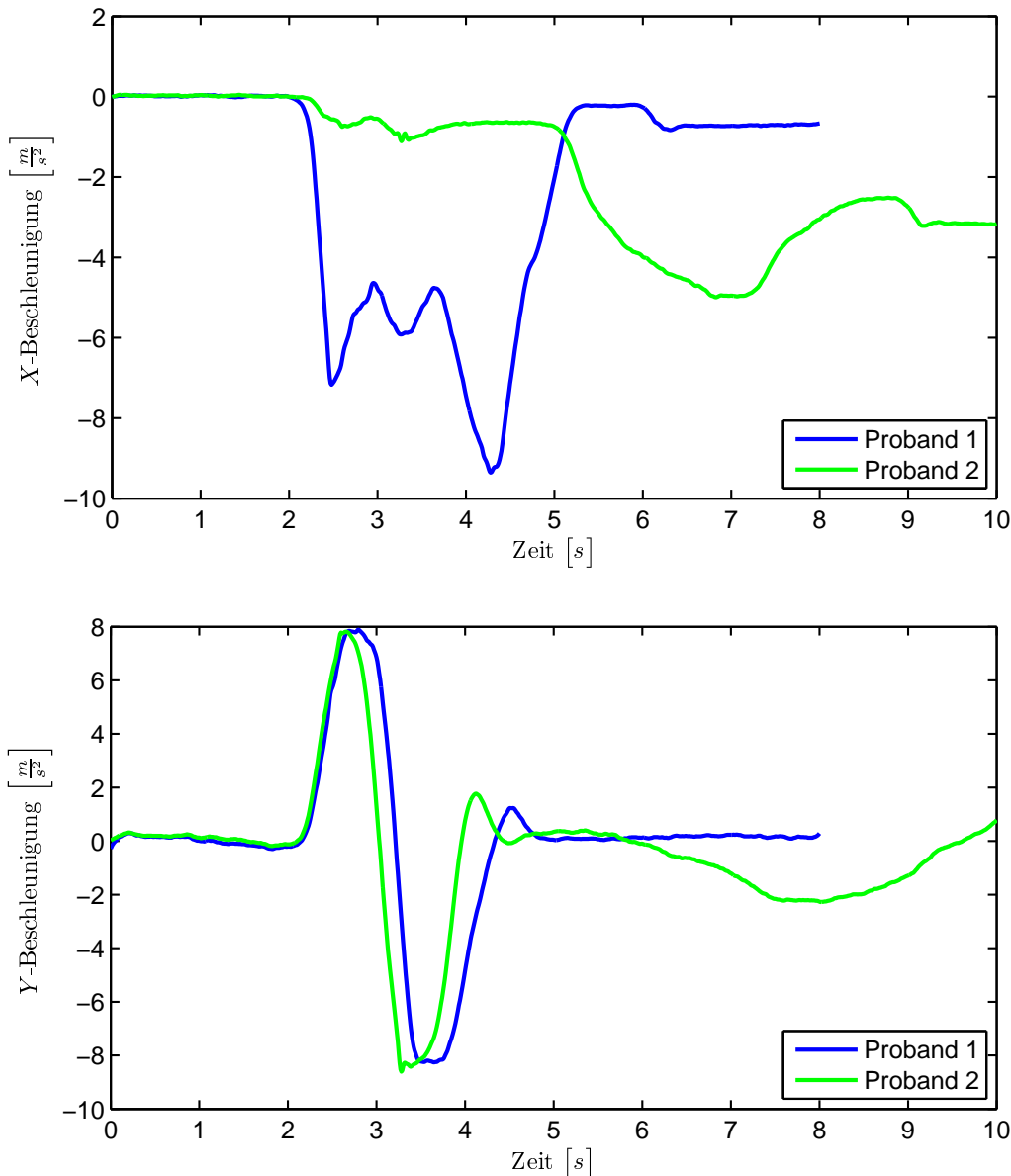


Abbildung 3.4: Beschleunigung in X- und Y-Richtung

Das Zusammenspiel von Längs- und Querbeschleunigung wird in Abbildung 3.5 dargestellt, in der beide übereinander aufgetragen sind. Die längsten Beschleunigungsvektoren sind jeweils mit schwarzen Pfeilen markiert. Zusätzlich ist der Kamm'sche Kreis für einen Reibbeiwert von  $\mu_h = 1$  eingezeichnet. Der Kamm'sche Kreis zeigt die Grenze der resultierenden Beschleunigung<sup>(b)</sup> bei gleichzeitiger Längs- und Querbeschleunigung. Endet der Beschleunigungsvektor im Inneren des Kamm'schen Kreises, so können die notwendigen Kräfte von den Rädern auf die Straße übertragen werden. Außerhalb des Kreises ist dies nicht möglich. Der Radius entspricht der

<sup>(b)</sup> Alternativ wird der Kamm'sche Kreis auch als Grenze der übertragbaren Längs- und Querkkräfte verstanden. Diese Betrachtung ist bei konstanter Masse gleichbedeutend mit der hier verwendeten Darstellung.

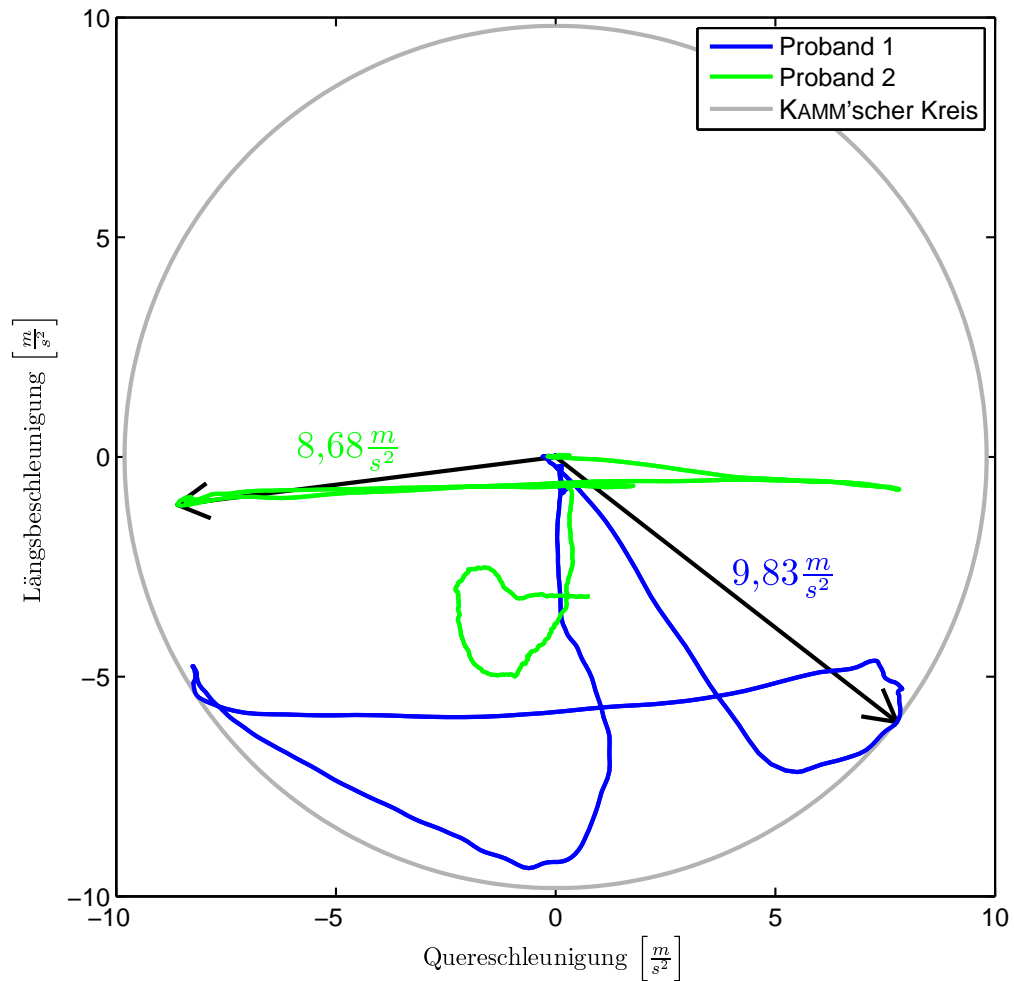


Abbildung 3.5: Längs- über Quereschleunigung im Kamm'schen Kreis

maximalen Gesamtbeschleunigung. Für den ersten Probanden hat der längste Beschleunigungsvektor eine Länge von  $9,83 \frac{m}{s^2}$ . Definitionsgemäß entspricht dies auch dem Wert des Qualitätsfunktional für die von ihm gewählte Trajektorie:  $F_{Proband1} = 9,83 \frac{m}{s^2}$ . Dieser Wert überschreitet die Grenze von  $1g_{Erde}$  Gesamtbeschleunigung und verlässt damit kurzzeitig den Kamm'schen Kreis. Für die zweite Testperson hat der längste Beschleunigungsvektor nur eine Länge von  $F_{Proband2} = 8,68 \frac{m}{s^2}$ . Die gewählte Trajektorie ist auch bei einem Reibbeiwert von  $\mu < 1$  realisierbar, wohingegen die Trajektorie der ersten Versuchsperson einen Reibbeiwert  $\mu > 1$  benötigt. Die zweite Trajektorie ist also bei niedrigerem Reibbeiwert fahrbar. Bei identischem Reibbeiwert ist sie robuster gegenüber Störungen, denn die Versuchsperson könnte einer Störung stets mit einer größeren Beschleunigung begegnen. Die Trajektorie der zweiten Versuchsperson ist somit „besser“ zur Kollisionsvermeidung geeignet als die der ersten. Tabelle 3.2 fasst diese Überlegungen noch einmal zusammen. Anhand dieses Beispiels wird folgendes plausibilisiert: Je niedriger der Wert des

	$F$	Eigenschaften der Trajektorie
Versuchsperson 1	$9,83 \frac{m}{s^2}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Benötigt einen größeren Reibbeiwert</li> <li>• Weniger robust gegenüber Störungen</li> <li>• Insgesamt schlechter zur Kollisionsvermeidung geeignet</li> </ul>
Versuchsperson 2	$8,68 \frac{m}{s^2}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Benötigt einen geringeren Reibbeiwert</li> <li>• Robuster gegenüber Störungen</li> <li>• Insgesamt besser zur Kollisionsvermeidung geeignet</li> </ul>

Tabelle 3.2: Vergleich zweier Trajektorien

Qualitätsfunktionalis ist, desto eher kann mit entsprechenden Trajektorie eine Kollision vermieden werden. Ob der Fahrer versuchen sollte, auf einer Trajektorie mit möglichst kleinem Wert des Qualitätsfunktionalis zu fahren, wird bei der Veranschaulichung der Stellvertretertrajektorie im nächsten Abschnitt diskutiert.

### 3.1.2.2 Veranschaulichung der Stellvertretertrajektorie

Für die Verkehrssituation des vorangegangenen Beispiels wurde eine Stellvertretertrajektorie numerisch bestimmt. Die folgenden Abbildungen zeigen sie zusammen mit den Trajektorien der Probanden. Dabei ist zu sehen, dass die Stell-

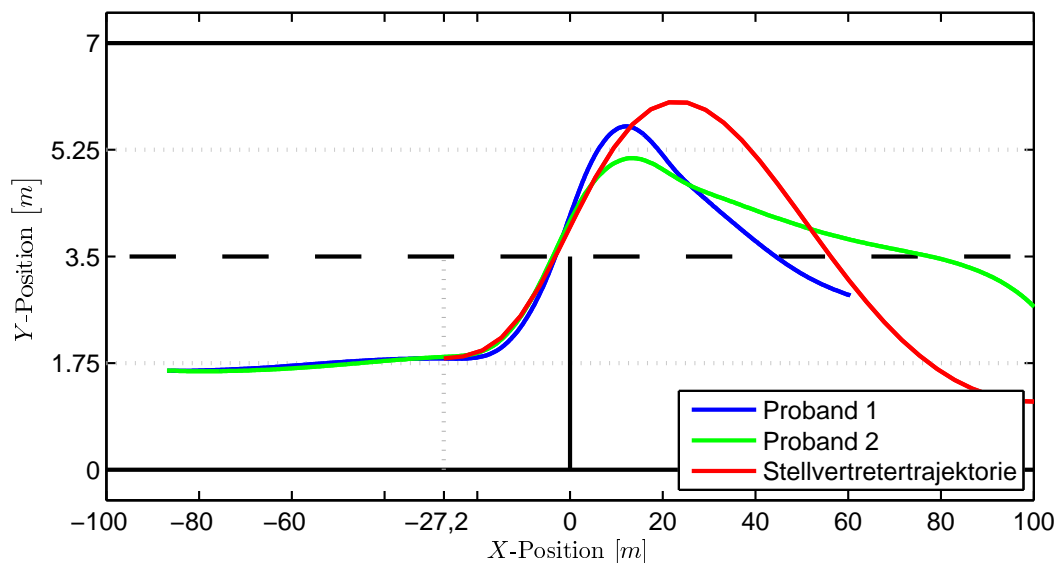


Abbildung 3.6: Trajektorien der Versuchspersonen und eine Stellvertretertrajektorie in der Draufsicht

vertretertrajektorie der Lösungsmethode entspricht, die die zweite Testperson genutzt hat: Die Stellvertretertrajektorie beschreibt ein Manöver, bei dem nur gelenkt und nicht gebremst wird. Weiter ist in der Draufsicht in Abbildung 3.6 zu erkennen, dass die Stellvertretertrajektorie den verfügbaren Raum vollständig ausnutzt. Die seitlichen Abstände zum Hindernis und zum linken Fahrbahnrand betragen jeweils eine halbe Fahrzeugbreite. Es ist zu sehen, dass der maximale Querversatz deutlich später erreicht wird.

Abbildung 3.7 zeigt, dass die Stellvertretertrajektorie nur Beschleunigungen in Y-Richtung – also in Querrichtung – enthält. Die negative Beschleunigung in X-Richtung entsteht im Wesentlichen durch den Schräglauf der Vorderräder. Weiter ist ersichtlich, dass die Beschleunigung in negativer Y-Richtung für die Stell-

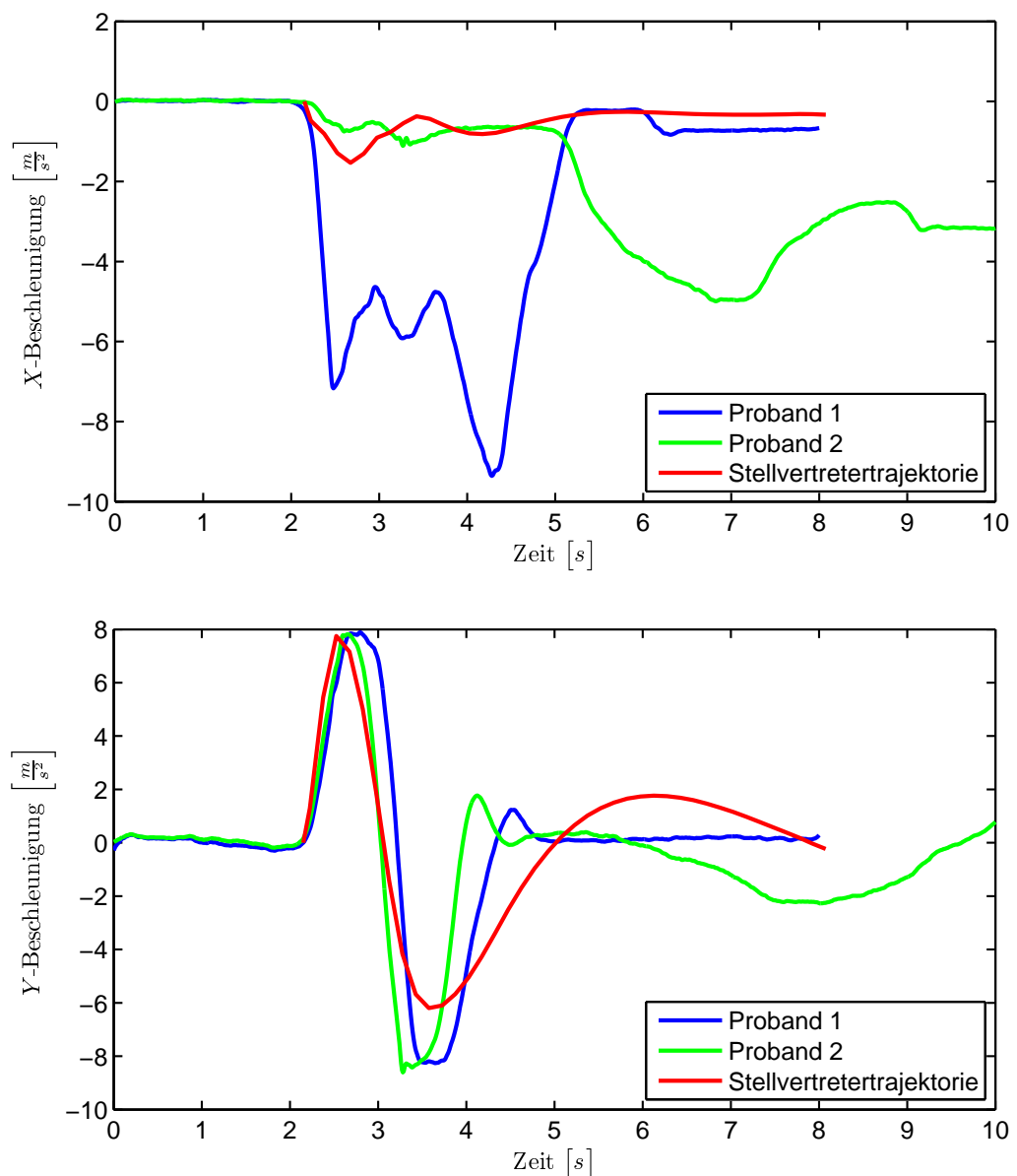


Abbildung 3.7: Beschleunigung in X- und Y-Richtung

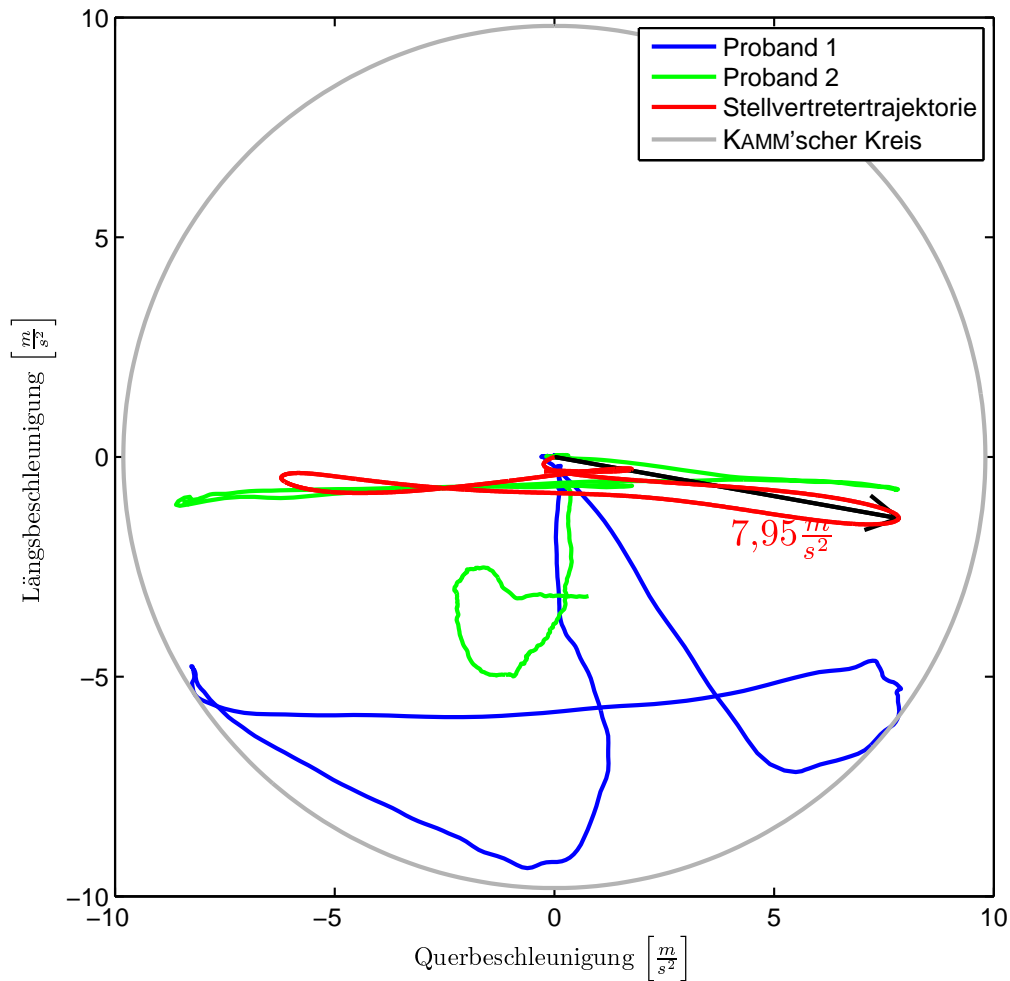


Abbildung 3.8: Längs- über Querbeschleunigung im Kamm'schen Kreis

vertretertrajektorie wesentlich kleiner ausfällt als bei den beiden Probanden. Die Darstellung der Stellvertretertrajektorie im Kamm'schen Kreis (Abbildung 3.8) zeigt noch einmal, dass bei der Stellvertretertrajektorie kaum Verzögerung in Längsrichtung auftritt. Tabelle 3.3 fasst die Beobachtungen noch einmal zusammen.

Obwohl die Stellvertretertrajektorie optimal im Sinne einer Kollisionsvermeidung ist, muss sie nicht notwendigerweise die beste Wahl für den Fahrer des Ego-Fahrzeugs sein. Der Fahrer hat bei seiner Bahnplanung neben der Kollisionsvermeidung noch einen weiteren Aspekt zu beachten: Er muss versuchen, potentielle Unfallsfolgen zu minimieren. Dazu muss er berücksichtigen, dass es bei der Umsetzung der gewählten Trajektorie mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit doch zu einer Kollision kommt. Die Schwere der zu erwartenden Unfallfolgen hängt insbesondere davon ab, ob entlang der Trajektorie gebremst wird. Die Gewichtung des Aspektes hänge von zahlreichen Faktoren ab wie die folgenden Beispiele demonstrieren:



- Ein Motorradfahrer droht bei hoher Geschwindigkeit mit einem stehenden Fahrzeug zu kollidieren. Der wenig geschützte Motorradfahrer muss auch bei geringen Kollisionsgeschwindigkeiten ernsthaften Verletzungen rechnen. Daher hat die Kollisionsvermeidung für ihn höchste Priorität.
- Ein PKW droht mit einem stehenden Fahrzeug zu kollidieren, wobei die zu erwartende Kollisionsgeschwindigkeit für den Fall dass das Fahrzeug bremsst sehr gering ist. Auch wenn sich die Wahrscheinlichkeit einer Kollision im Vergleich zu einem Ausweichmanöver erhöht, kann die Vollbremsung eine sinnvolle Wahl für den PKW-Fahrer sein, weil die Wahrscheinlichkeit ernsthafter Verletzungen sinkt.

Die Beispiele machen deutlich, dass eine Stellvertretertrajektorie nicht notwendigerweise beste Option für den Fahrer darstellt. Daher ist auch eine automatische Umsetzung der Stellvertretertrajektorie nicht sinnvoll. Im folgenden Abschnitt wird eine andere Verwendungsmöglichkeit für die Stellvertretertrajektorie dargestellt.

	$F$	Eigenschaften der Trajektorie
Versuchsperson 1	$9,83 \frac{m}{s^2}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Benötigt einen größeren Reibbeiwert</li> <li>• Weniger robust gegenüber Störungen</li> <li>• Insgesamt schlechter zur Kollisionsvermeidung geeignet</li> </ul>
Versuchsperson 2	$8,68 \frac{m}{s^2}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Benötigt einen geringeren Reibbeiwert</li> <li>• Robuster gegenüber Störungen</li> <li>• Insgesamt besser zur Kollisionsvermeidung geeignet</li> </ul>
Stellvertretertrajektorie	$7,95 \frac{m}{s^2}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Benötigt den geringsten Reibbeiwert</li> <li>• Am robustesten gegenüber Störungen</li> <li>• Optimal zur Kollisionsvermeidung geeignet</li> </ul>

Tabelle 3.3: Vergleich zweier Trajektorien und einer Stellvertretertrajektorie

## 3.2 Situationsbewertung mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien

### 3.2.1 Definition

Für die Situationsbewertung wird die Optimalität der Stellvertretertrajektorie genutzt. Der logische Schluss für die Auslösung der automatischen Notbremsung soll folgender sein: Wenn selbst mit einer Stellvertretertrajektorie eine Kollision

unvermeidbar ist, dann führen auch alle anderen Trajektorien zur Kollision. Die Tatsache, dass eine Kollision auch mit einer Stellvertretertrajektorie nicht zu vermeiden ist, soll daran erkannt werden, dass der Wert des Qualitätsfunktional der Stellvertretertrajektorie einen Schwellwert  $\alpha_{Schwell}^{(c)}$  überschreitet. Dazu wird zunächst die Bewertungsfunktion für Verkehrssituationen definiert:

**Definition 4** (Bewertungsfunktion für Verkehrssituationen)

*Sei eine Verkehrssituation  $\mathcal{V}$  gegeben und sei  $(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2)$  eine Stellvertretertrajektorie für diese Verkehrssituation, dann ist die Bewertungsfunktion  $G$  mit*

$$G(\mathcal{V}) := F(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2)$$

*definiert.*

Die Verkehrssituation wird also mit einer Kenngröße einer einzigen, speziellen Trajektorie bewertet. Dies stellt den wesentlichen Unterschied zu den Verfahren nach dem Stand der Technik dar: Die Verfahren von Kopischke und Busch untersuchen einen kleinen Satz vorgegebener Trajektorien darauf, ob sie zu Kollision führen. Dabei stehen also zuerst die Trajektorien fest und dann wird geprüft, ob sie kollisionsfrei sind. Bei der obigen Bewertungsfunktion ist das Vorgehen umgekehrt. Hier wird erst eine kollisionsfreie Trajektorie berechnet und dann wird geprüft, ob sie realisierbar ist. Das Verfahren der Verfolgung von Aufenthaltsgebieten untersucht alle Trajektorien simultan darauf, ob sie kollisionsfrei sind. Auch hier ist zunächst die Menge der zu untersuchenden Trajektorien durch die Vorgabe der maximalen Beschleunigung  $\alpha_{VA}$  festgelegt und dann erfolgt ihre Überprüfung auf Kollisionsfreiheit.

**Definition 5** (Auslösekriterium für die automatische Notbremsung)

*Sei eine Verkehrssituation  $\mathcal{V}$  gegeben. Gilt  $G(\mathcal{V}) > \alpha_{Schwell}$ , so ist eine Kollision unvermeidbar und die automatische Notbremsung wird ausgelöst.*

Mit dem Auslösekriterium wird aus der Bewertungsfunktion eine binäre Entscheidung abgeleitet. Der dazu genutzte Schwellwert  $\alpha_{Schwell}$  ist eine zu bestimmende Konstante. Alternativ kann  $\alpha_{Schwell}$  auch in Abhängigkeit vom aktuellen Straßenzustand variiert werden. Auch eine Anpassung an den Zustand des Fahrers ist denkbar. Eine Variation in Abhängigkeit des Straßen- und des Fahrerzustandes sollte Inhalt weiterer Forschungsarbeiten sein. Im Rahmen dieser Arbeit ist  $\alpha_{Schwell}$  stets eine Konstante.

Für den Fall, dass die Bewertungsfunktion  $G(\mathcal{V})$  kleiner als der Schwellwert  $\alpha_{Schwell}$  ist – und somit nicht auf eine unvermeidbare Kollision geschlossen werden kann – stellt  $G(\mathcal{V})$  ein Maß für die „Kritikalität“ der Verkehrssituation dar. In

---

<sup>(c)</sup>Der Schwellwert ist genau wie der Wert der Bewertungsfunktion und des Qualitätsfunktional eine Beschleunigung und wird deshalb mit  $\alpha_{Schwell}$  benannt.

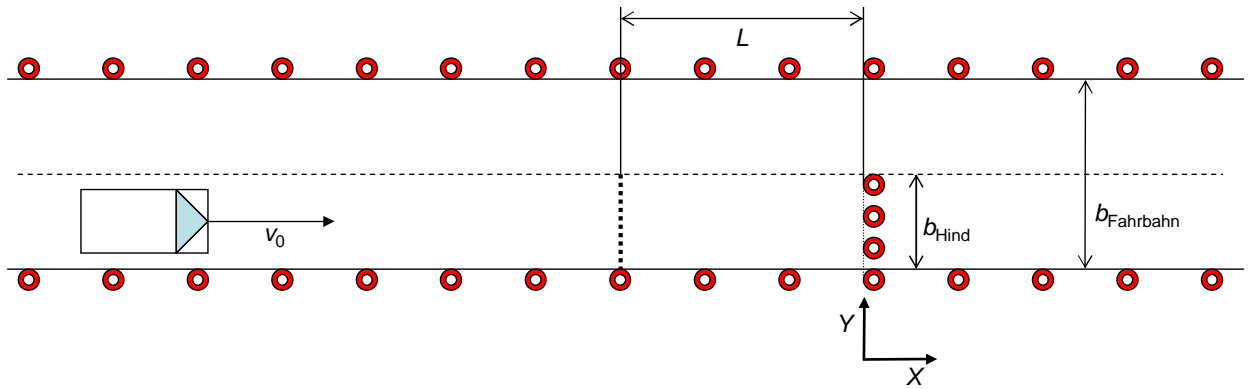


Abbildung 3.9: Verkehrssituation

	$v_0$	$L$	$y_0$	$\psi_0$	$\dot{\psi}_0$
Verkehrssituation $\nu_1$	$27,81 \frac{m}{s}$	$28,32m$	$1,72m$	$0,466^\circ$	$-0,309 \frac{^\circ}{s}$
Verkehrssituation $\nu_2$	$19,44 \frac{m}{s}$	$34,75m$	$1,72m$	$0,007^\circ$	$0,190 \frac{^\circ}{s}$

Tabelle 3.4: Situationsbeschreibende Größen der zu bewertenden Verkehrssituationen

Abschnitt 6.3.3 wird mit einem Fahrversuch gezeigt, dass ein monotoner Zusammenhang zwischen der Bewertungsfunktion und der empirischen Kollisionswahrscheinlichkeit besteht. Eine Analyse dieses Zusammenhangs muss Inhalt weiterer Untersuchungen sein. Die Verfahren von Kopischke und Busch sowie das Verfahren der Verfolgung von Aufenthaltsgebieten führen hingegen ausschließlich zu binären Entscheidungen.

### 3.2.2 Veranschaulichung

Anhand eines Beispiels wird gezeigt, dass mit Hilfe der Bewertungsfunktion eine gefährliche Verkehrssituation von einer ungefährlichen unterschieden werden kann. Ferner werden die zugehörigen Stellvertretertrajektorien dargestellt.

Die Verkehrssituationen, die hier verglichen werden, sind von der gleichen Art wie die Situationen im vorigen Abschnitt (Abbildung 3.9). Die Breite des Hindernisses  $b_{Hind}$  und der Fahrbahn  $b_{Fahrbahn}$  sind für beide Verkehrssituationen identisch. Die Situationen unterscheiden sich nur im Zustand des Ego-Fahrzeugs: In der ersten Verkehrssituation  $\nu_1$  ist die Ausgangsgeschwindigkeit  $v_0$  höher und der Abstand  $L$  zum Hindernis kleiner als in der zweiten Verkehrssituation  $\nu_2$ . Die Unterschiede im Gierwinkel  $\psi_0$  und in der Gierrate  $\dot{\psi}_0$  sind klein (Tabelle 3.4).  $\nu_1$  ist also deutlich „kritischer“ als  $\nu_2$ .

Die Stellvertretertrajektorien, die im Folgenden exemplarisch dargestellt werden, wurden numerisch bestimmt. Das Verfahren, mit dem sie bestimmt wurden, wird in Kapitel 5 ausgeführt. In Abbildung 3.10 sind sie in der Draufsicht abgebil-

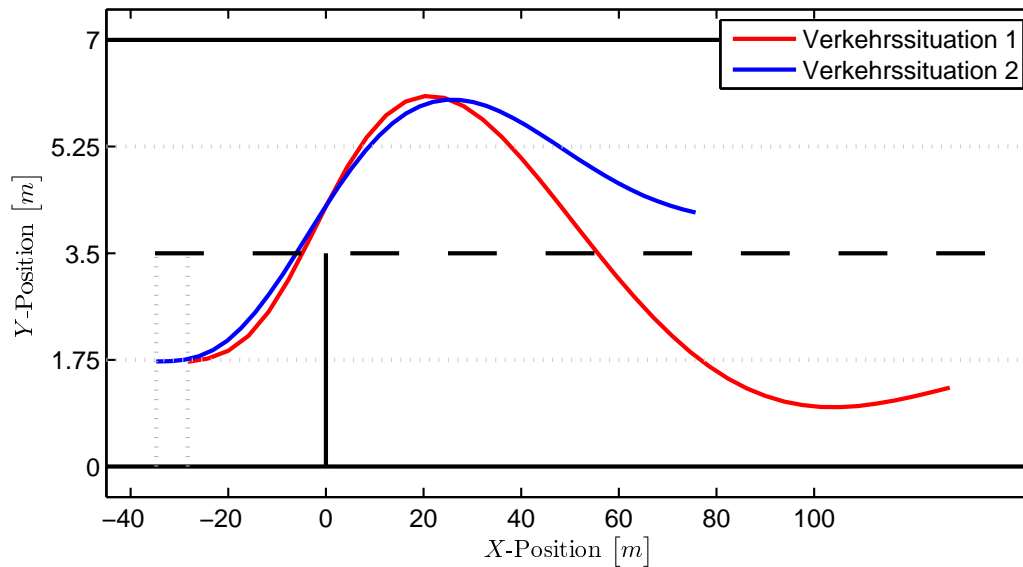


Abbildung 3.10: Stellvertretertrajektorien in der Draufsicht

det. Es ist jeweils die Position des Schwerpunkts dargestellt. Das Fahrzeug, welches bei der Berechnung berücksichtigt wurde, hat eine Breite von  $1,76m$ . Sein Schwerpunkt kann sich höchstens bis auf eine halbe Fahrzeugbreite – hier also  $88cm$  – dem Hindernis und den Fahrbahnranden nähern. Beide Stellvertretertrajektorien passieren das Hindernis in einem Abstand von ungefähr  $90cm$ . Beide nähern sich bis auf ungefähr  $90cm$  dem linken Fahrbahnrand an. Die Stellvertretertrajektorien nutzen den zur Verfügung stehenden Raum also erwartungsgemäß weitestgehend aus.

Wie beim Trajektorienvergleich in Abschnitt 3.1.2.1 kann anhand der Draufsicht nicht beurteilt werden, welche Beschleunigungen auftreten. Abbildung 3.11 zeigt den zeitlichen Verlauf der X- und Y-Beschleunigung. Auffällig ist, dass die X-Beschleunigung nur kleine Werte annimmt. Die „eckige“ Form ist eine Folge der Parametrisierung. Die Beschleunigungswerte sind nur für wenige Stellen berechnet und dazwischen interpoliert. Die X- und Y-Beschleunigung werden in Abbildung 3.12 übereinander aufgetragen. Die Beschleunigung in X-Richtung spielt im Verhältnis zur Beschleunigung in Y-Richtung eine untergeordnete Rolle. Die Stellvertretertrajektorien beschreiben also reine Ausweichmanöver ohne Längsverzögerung.

Tabelle 3.5 fasst die beiden Verkehrssituationen und ihre Bewertung noch einmal zusammen. Für die schwierigere erste Situation wurde ein wesentlich größerer Wert der Bewertungsfunktion  $G$  berechnet als für die unkritischere zweite Situation. Die Bewertungsfunktion  $G$  ist geeignet, um die beiden Verkehrssituationen hinsichtlich ihrer „Gefährlichkeit“ zu trennen.

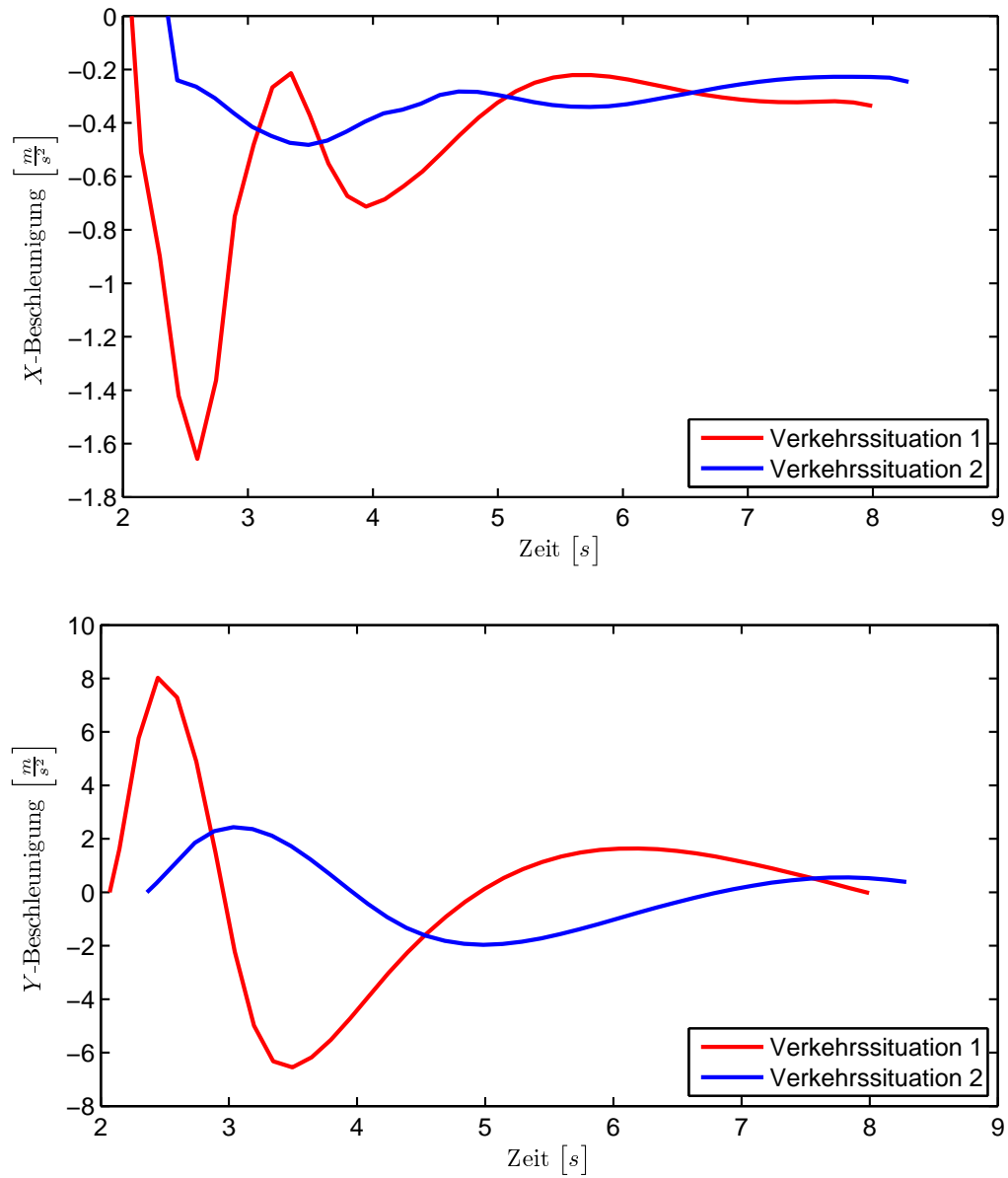


Abbildung 3.11: Beschleunigung in X- und Y-Richtung

	Auslöse- geschwindigkeit $v_0$	Auslöse- abstand $L$	$G(v)$
Verkehrssituation $v_1$	$27,81 \frac{m}{s}$	$28,32m$	$8,15 \frac{m}{s^2}$
Verkehrssituation $v_2$	$19,44 \frac{m}{s}$	$34,75m$	$2,47 \frac{m}{s^2}$

Tabelle 3.5: Bewertung zweier Verkehrssituationen

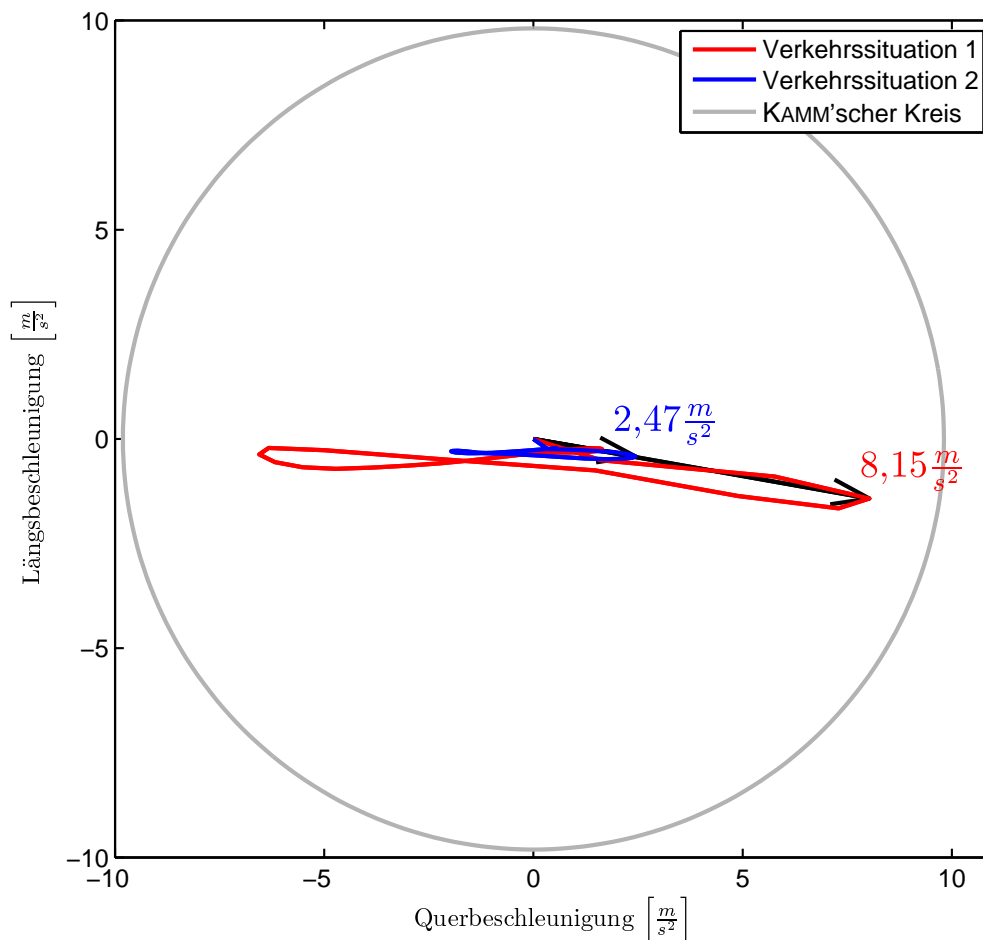


Abbildung 3.12: Längs- über Querbeschleunigung im Kamm'schen Kreis

### 3.3 Thesen

Die folgenden Aussagen bezüglich des vorgestellten Verfahrens sind **negativ** formuliert damit sie widerlegt werden können.

#### These 1

*Die mit der Bewertungsfunktion  $G$  berechneten Längen der Beschleunigungsvektoren haben keinen Bezug zu den tatsächlich aufzubringenden Beschleunigungen. Es ist möglich eine Kollision mit einer Beschleunigung, die niedriger als die berechnete ist, zu vermeiden.*

#### These 2

*Mit Hilfe der Bewertungsfunktion  $G$  ist keine Unterteilung der Verkehrssituationen in solche, die zur Kollision führen, und solche, die nicht notwendigerweise zur Kollision führen, möglich.*

#### *These 3*

*Die Erkennung unvermeidbarer Kollisionen mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien führt nicht zu einer früheren Auslösung der automatischen Notbremsung im Vergleich zu Auslösekriterien nach dem Stand der Technik. Eine Reduktion der Verletzungsschwere ist nicht zu erwarten.*





## 4 Theoretische Grundlagen

Für die Berechnung von Stellvertretertrajektorien werden Erkenntnisse sowohl der Ingenieurwissenschaften als auch der Mathematik benötigt. Die Dynamik des Fahrzeugs wird mit einem Einspurmodell modelliert. Die Reifen werden dabei mit der Pacejka Magic Formula modelliert. Diese Modelle sind Inhalt des ersten Abschnitts. Im zweiten Abschnitt werden die Probleme der optimalen Steuerung – zu denen auch die Berechnung von Stellvertretertrajektorien gehört – als spezielle Optimierungsprobleme dargestellt.

### 4.1 Fahrzeugmodell

Die Dynamik des Fahrzeugs soll mit einem geeigneten Fahrzeugmodell abgebildet werden. Bei der Auswahl eines Modells ist stets zwischen dem Detaillierungsgrad und der Handhabbarkeit abzuwägen. Für diese Arbeit ist ein Modell erforderlich, das ein Schleudern des Fahrzeugs nachbilden kann. Aus diesem Grund scheidet das Einradmodell aus. Das Einspurmodell dagegen kann – insbesondere bei geeignetem Reifenmodell – das Schleudern abbilden. Das Zweispurmodell kann zusätzlich noch die Wank- und Nickdynamik und die resultierenden dynamischen Radlastveränderungen berücksichtigen. Der Zugewinn an Genauigkeit rechtfertigt den Mehraufwand in der Berechnung jedoch nicht.

Im Folgenden werden die Grundzüge des verwendeten Einspurmodells beschrieben. Die Wahl des Reifenmodells hat dabei maßgeblichen Einfluss auf die Eigenschaften des Fahrzeugmodells. Die verwendete Pacejka Magic Formula beschreibt den nichtlinearen Zusammenhang zwischen dem Schräglaufwinkel und der Seitenkraft.

#### 4.1.1 Einspurmodell

Beim Einspurmodell, welches 1940 von Riekert und Schunck (RS40) eingeführt wurde, wird gegenüber der Realität vereinfachend angenommen, dass sich der Schwerpunkt des Fahrzeugs auf Fahrbahnhöhe befindet. Durch diese Annahme werden Wank- und Nickbewegungen des Fahrzeugs vernachlässigt, sodass keine dynamischen Radlastveränderungen auftreten. Auf die beiden Vorderräder und die beiden Hinterräder wirken jeweils ähnliche Kräfte und Momente – sie werden jeweils zu einem Rad zusammengefasst. Dadurch verfügt das Modell nur noch über ein Vorder- und ein Hinterrad und es erklärt sich die Bezeichnung „Einspurmodell“.

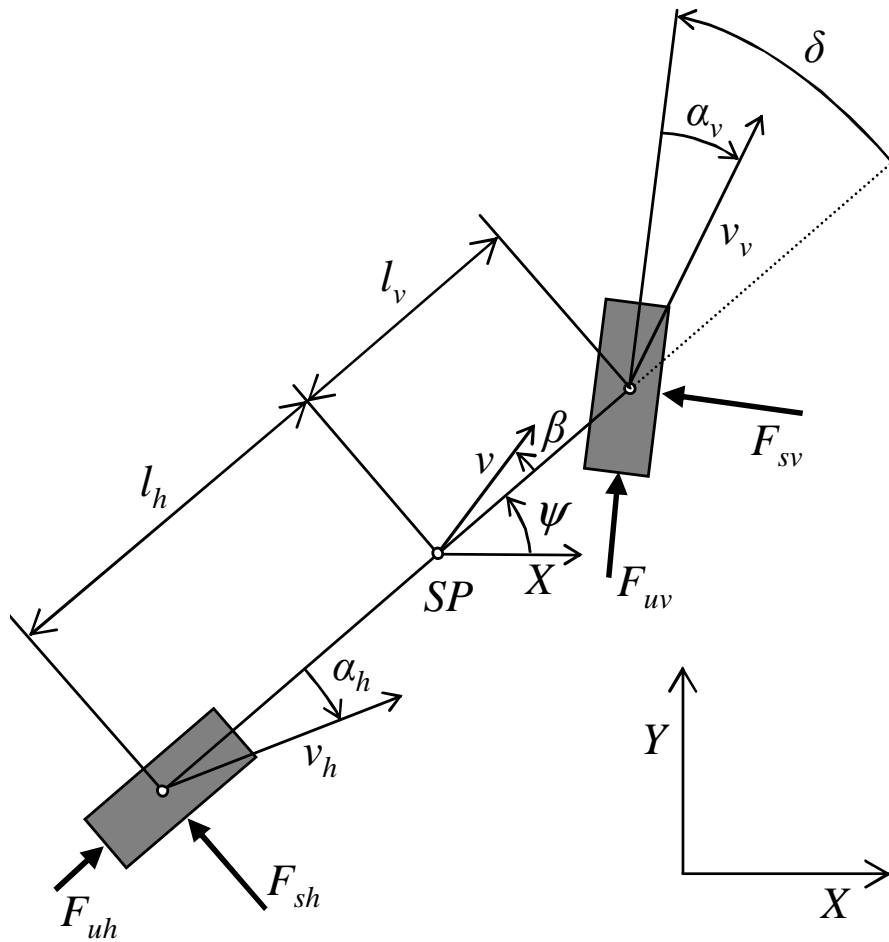


Abbildung 4.1: Kräfte und geometrische Größen des Einspurmodells

Abbildung 4.1 gibt einen Überblick über die Geometrie und die Zuordnung der folgenden Formelsymbole des Einspurmodells.

$SP$	Schwerpunkt
$l_v, l_h$	Abstand des Schwerpunkts von der Vorder- bzw. Hinterachse
$F_{sv}, F_{sh}$	seitliche Kraft am Vorder- bzw. Hinterrad
$F_{uv}, F_{uh}$	Umfangskraft am Vorder- bzw. Hinterrad
$v$	Geschwindigkeit des Fahrzeugschwerpunkts
$v_v, v_h$	Geschwindigkeit des Vorder- bzw. Hinterrades
$\alpha_v, \alpha_h$	Schräglaufwinkel des Vorder- bzw. Hinterrades
$\beta$	Schwimmwinkel
$\delta$	Vorderradeinschlagwinkel
$m$	Masse des Fahrzeugs
$I_{zz}$	Trägheitsmoment um die Hochachse
$\psi$	Gierwinkel
$\omega_z = \dot{\psi}$	Gierrate

Der Schräglaufwinkel ist der Winkel zwischen der Radebene und der Bewegungsrichtung des Rades in ihrer Projektion auf die Fahrbahn. Der Schwimmwinkel  $\beta$  ist der Winkel zwischen der Fahrzeuglängsachse und der

Bewegungsrichtung des Schwerpunkts. Die  $X$ - und  $Y$ -Positionen werden bezüglich eines geografisch fixierten Koordinatensystems angegeben. Der Gierwinkel  $\psi$  ist der Winkel zwischen Fahrzeuglängsachse und der  $X$ -Achse.

Aus der Zeichnung in Abbildung 4.1 ergeben sich einige geometrische Beziehungen für die Winkel.

Schräglaufwinkel

$$\alpha_v = \delta - \arctan \left( \frac{l_v \dot{\psi} - v \sin(\beta)}{v \cos(\beta)} \right) \quad (4.1)$$

$$\alpha_h = \arctan \left( \frac{l_h \dot{\psi} + v \sin(\beta)}{v \cos(\beta)} \right) \quad (4.2)$$

Schwimmwinkel

$$\beta = \psi - \arctan \left( \frac{\dot{y}}{\dot{x}} \right) \quad (4.3)$$

Die folgenden Bewegungsgleichungen beschreiben die Dynamik des Modells. Sie ergeben sich aus Impuls- und Drallsatz.

Positionsänderung

$$\dot{x} = v \cos(\psi - \beta) \quad (4.4)$$

$$\dot{y} = v \sin(\psi - \beta) \quad (4.5)$$

Geschwindigkeitsänderung

$$\dot{v} = \frac{F_{uh} \cos(\beta) + F_{uv} \cos(\delta + \beta) - F_{sh} \sin(\beta) - F_{sv} \sin(\delta + \beta)}{m} \quad (4.6)$$

Schwimmwinkeländerung

$$\dot{\beta} = \omega_z - \frac{F_{uh} \sin(\beta) + F_{uv} \sin(\delta + \beta) + F_{sh} \cos(\beta) + F_{sv} \cos(\delta + \beta)}{mv} \quad (4.7)$$

Gierwinkeländerung

$$\dot{\psi} = \omega_z \quad (4.8)$$

Gierratenänderung

$$\dot{\omega}_z = \frac{F_{sv} l_v \cos(\delta) - F_{sh} l_h + F_{uv} l_v \sin(\delta)}{I_{zz}} \quad (4.9)$$

wobei  $I_{zz}$  das Trägheitsmoment um die Hochachse bezeichnet

Die Bewegungsgleichungen sind ein System nichtlinearer Differentialgleichungen erster Ordnung. Das System bleibt selbst dann nichtlinear, wenn Sinus und Kosinus linearisiert werden, weil für die seitlichen Reifenkräfte  $F_{sv}$  und  $F_{sh}$  die nichtlineare Pacejka Magic Formula verwendet wird. Sie wird im Folgenden beschrieben.

### 4.1.2 Reifenmodell

Nur über die Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche können Kräfte vom Fahrzeug auf die Straße aufgebracht werden. Dementsprechend wichtig ist die Modellierung der Reifen für das gesamte Fahrzeugmodell. Oft wird an dieser Stelle ein linearer Zusammenhang von Schräglaufwinkel und der quer zur Bewegungsrichtung wirkenden Kraft angenommen. Die Proportionalitätsfaktoren werden als Schräglaufsteifigkeiten bezeichnet, wobei im Allgemeinen für die vordere und die hintere Achse verschiedene Werte angenommen werden. Die Annahme eines linearen Zusammenhangs ist nur sinnvoll, solange der Betrag des Schräglaufwinkels kleiner als  $7^\circ$  ist. Für größere Schräglaufwinkel gelangt die Querkraft schnell in eine Sättigung und weicht damit deutlich vom linearen Verhalten ab. Bei den hier untersuchten Manövern treten regelmäßig Schräglaufwinkel auf, die größer als  $7^\circ$  sind. Die Annahme eines linearen Zusammenhangs ist daher nicht gerechtfertigt.

Leider sind die nichtlinearen, physikalischen Effekte der Reifen-Straße-Kontaktfläche nicht vollständig aufgeklärt. Das verwendete nichtlineare Reifenmodell von Pacejka basiert daher nicht auf physikalischen Überlegungen. Vielmehr wird versucht, die experimentell bestimmte Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennlinie mit wenigen Parametern möglichst präzise nachzubilden (PBL89). Die Parameter erhalten anschauliche Namen, sie besitzen aber keine physikalische Interpretation.

Definition 6 (Pacejka Magic Formula)

*Die Seitenkraft am Vorderrad  $F_{sv}$  und die Seitenkraft am Hinterrad  $F_{sh}$  sind Funktionen der jeweiligen Schräglaufwinkel  $\alpha_v$  und  $\alpha_h$ .*

$$F_{sv} = D \sin(C \arctan(B\alpha_v - E(B\alpha_v - \arctan(B\alpha_v)))) \quad (4.10)$$

$$F_{sh} = D \sin(C \arctan(B\alpha_h - E(B\alpha_h - \arctan(B\alpha_h)))) \quad (4.11)$$

*Die Parameter werden wie folgt benannt:*

*B Steifigkeitsfaktor*

*C Formfaktor*

*D Maximalwert*

*E Krümmungsfaktor*

Oftmals werden für Vorderräder und Hinterräder verschiedene Parametersätze gewählt.

Abbildung 4.2 zeigt eine Seitenkraft-Schräglauf-Kennlinie gemäß der Pacejka Magic Formula. Es ist zu erkennen, dass die Seitenkraft einen maximalen Wert nicht übersteigt und dass sie für betragsmäßig große Schräglaufwinkel abnimmt. Weiter ist zu erkennen, dass die Seitenkraft für kleine Schräglaufwinkel linear vom Schräglaufwinkel abhängt.

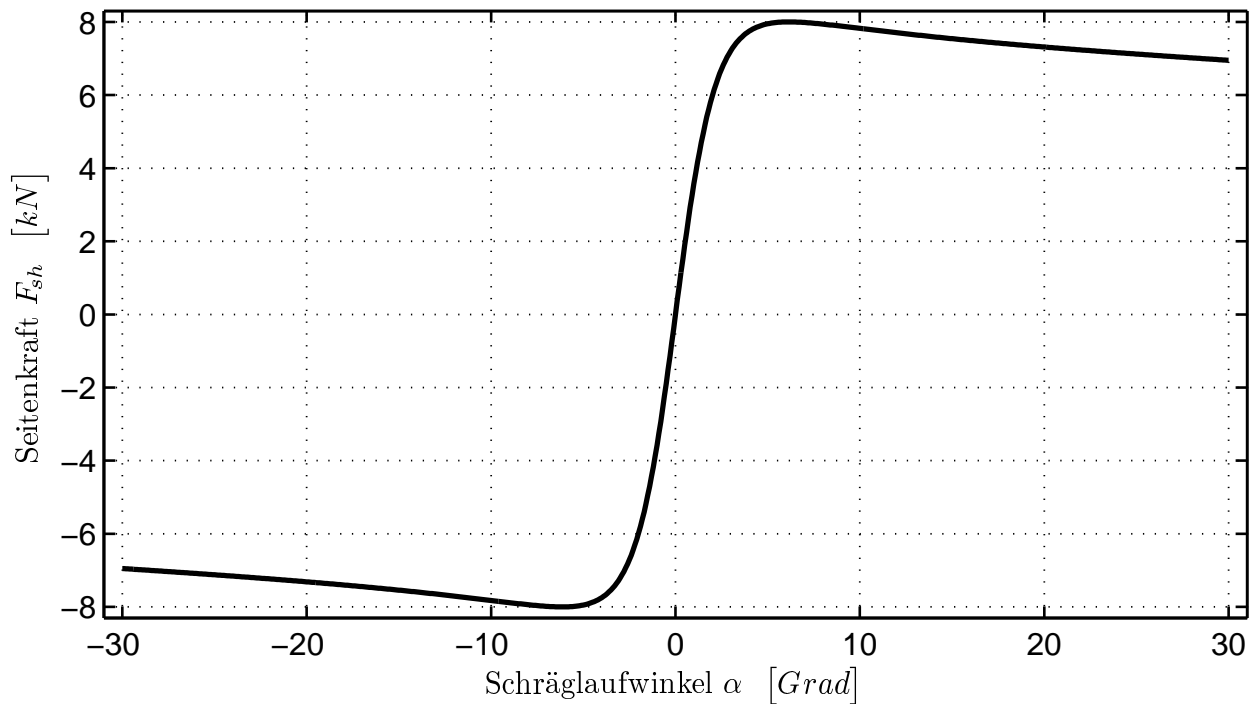


Abbildung 4.2: Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennlinie gemäß der Pacejka Magic Formula

Das Pacejka-Reifenmodell bildet lediglich den Zusammenhang von Schräglaufwinkel und Seitenkraft ab. Die Seitenkraft hängt außer vom Schräglaufwinkel noch von der Radlast, dem Reibbeiwert, den Umfangskräften und vom Sturzwinkel ab. Ferner hat die Seitenkraft ein dynamisches Verhalten, das im Allgemeinen durch sogenannte Reifeneinlaufängen beschrieben wird. Für diese Arbeit wird die Modellierung nach Pacejka als Kompromiss zwischen Modellgenauigkeit und Rechenaufwand verwendet.

## 4.2 Optimierung

Die Trajektorienberechnung wird in Kapitel 5 als Problem der optimalen Steuerung formuliert. Solche Probleme stellen eine spezielle Klasse von Optimierungsproblemen dar. In diesem Abschnitt werden eindimensionale, mehrdimensionale und unendlichdimensionale Optimierungsaufgaben kurz aufgeführt, um anschließend die Probleme der optimalen Steuerung als Spezialfall der unendlichdimensionalen Optimierung darzustellen. Es werden ausschließlich skalare, reellwertige

ge Aufgaben betrachtet. Dies stellt eine Abgrenzung gegenüber vektorieller Optimierung – auch Pareto-Optimierung genannt – und ganzzahliger Optimierung dar.

### 4.2.1 Eindimensionale Optimierung

Bei der eindimensionalen Optimierung wird für eine gegebene Zielfunktion  $F$  eine Position des Minimums gesucht. Die Formulierung „**eine** Position“ wird gewählt, weil es im Allgemeinen mehrere Positionen gibt, an denen das Minimum angenommen wird.

Oftmals dürfen die Argumente  $x$  für die Funktion  $F$  nur aus einer bestimmten Menge stammen. Diese sogenannte zulässige Menge wird für gewöhnlich mit  $\mathcal{X}$  bezeichnet.<sup>(a)</sup>  $\mathcal{X}$  ist stets eine Teilmenge von  $\mathbb{R}$  und kann auf verschiedene Weisen definiert werden. Üblich ist die Festlegung durch eine Ungleichung

$$\mathcal{X} := \{x \in \mathbb{R} \mid g(x) \leq 0\} \quad (4.12)$$

wobei  $g$  eine Funktion ist, die von  $\mathbb{R}$  nach  $\mathbb{R}$  abbildet. Die Ungleichung wird als Nebenbedingung bezeichnet.

**Definition 7 (eindimensionale Optimierung)**

*Gegeben seien eine Funktion  $F : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  und eine Menge  $\mathcal{X} \subset \mathbb{R}$ . Gesucht ist ein  $x^* \in \mathcal{X}$  mit*

$$F(x^*) \leq F(x) \text{ für alle } x \in \mathcal{X} \quad (4.13)$$

Falls  $\mathcal{X} = \mathbb{R}$  gilt, so wird die Aufgabe als unrestringiert bezeichnet. Ist hingegen  $\mathcal{X}$  eine echte Teilmenge<sup>(b)</sup> von  $\mathbb{R}$ , so wird die Aufgabe als restringiert bezeichnet.

#### Beispiel 1

Die Zielfunktion  $F$  sei durch  $F(x) = -x^3 + 12x^2 - 36x + 42$  gegeben. Die zulässige Menge  $\mathcal{X}$  wird gemäß Gleichung 4.12 mit Hilfe der Funktion  $g(x) = (x - 1)(x - 8)$  definiert. Gesucht ist  $x^*$  aus  $\mathcal{X}$ , für das  $F$  minimal wird.

Die Funktion  $g$  ist eine Parabel mit den Nullstellen  $x_{n,1} = 1$  und  $x_{n,2} = 8$ . Zwischen diesen Nullstellen sind die Werte von  $g(x)$  negativ. Die zulässige Menge  $\mathcal{X}$  ist somit ein Intervall.

$$\mathcal{X} = \{x \in \mathbb{R} \mid g(x) \leq 0\} = [1; 8]$$

Abbildung 4.3 zeigt die Funktionen  $F$  und  $g$  sowie die zulässige Menge  $\mathcal{X}$ . Sowohl für  $x_1^* = 2$  als auch für  $x_2^* = 8$  nimmt  $F$  auf  $\mathcal{X}$  das Minimum an.  $x_1^*$  ist ein innerer Punkt von  $\mathcal{X}$ . Für innere Punkte ist es notwendig, dass die Ableitung der Zielfunktion Null ist. Hinreichend ist es, wenn zusätzlich die zweite Ableitung positiv ist. Für Punkte am Rand gibt es keine ähnlich einfachen Bedingungen.

<sup>(a)</sup>Das Symbol „ $\mathcal{X}$ “ wird in Abgrenzung zu „ $X$ “ verwendet.  $\mathcal{X}$  bezeichnet die zulässige Menge.  $X$  wird im Zusammenhang mit „ $X$ -Richtung“ in einem Koordinatensystem verwendet

<sup>(b)</sup> $\mathcal{X}$  enthält somit nicht alle Elemente von  $\mathbb{R}$

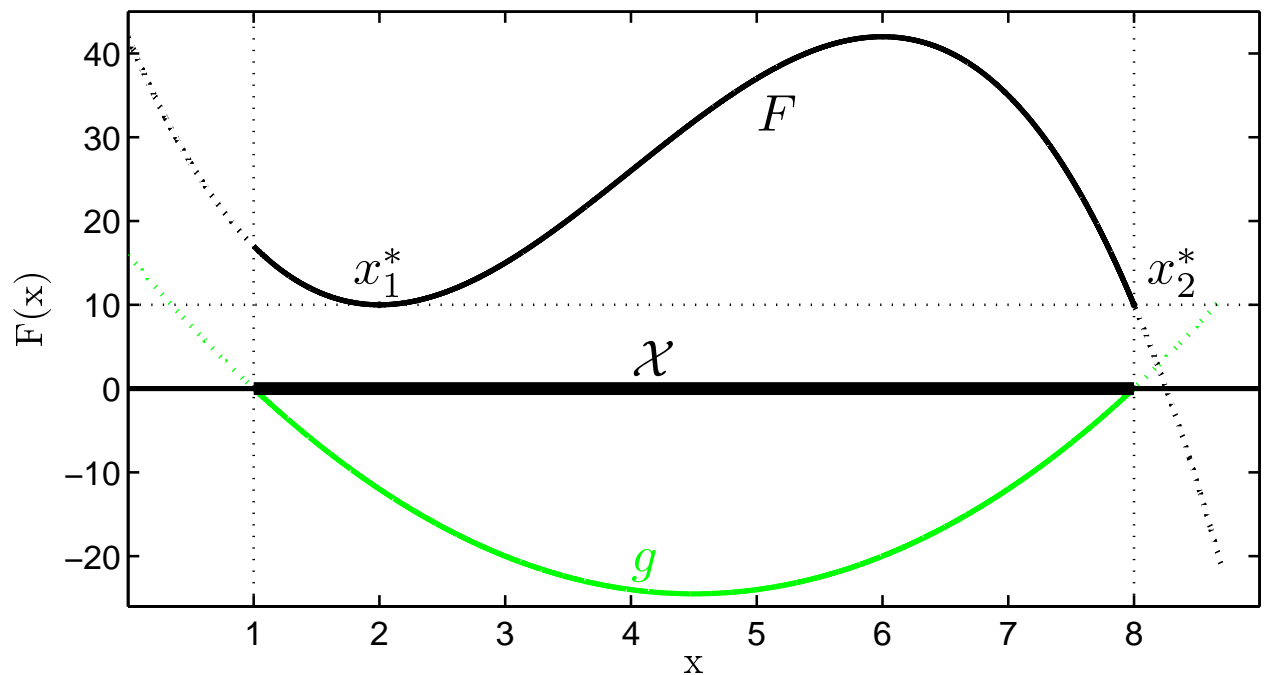


Abbildung 4.3: Eindimensionale Optimierung unter Nebenbedingungen

Schon bei eindimensionalen Optimierungsaufgaben können zahlreiche Sonderfälle auftreten. So ist es beispielsweise möglich, dass kein Minimum existiert oder, dass es zwar existiert, der zugehörige Punkt  $x^*$  aber kein Element von  $\mathcal{X}$  ist. Alle Schwierigkeiten, die bei der eindimensionalen Optimierung auftreten, treten auch bei der mehr- und unendlichdimensionalen Optimierung auf.

Ohne weiteres Wissen können Optimierungsaufgaben in dieser Form (Definition 7) nicht gelöst werden. Die Gleichung (4.13) stellt im Allgemeinen eine sehr starke Anforderung. Um zu zeigen, dass sie erfüllt ist, muss die Zielfunktion für alle Elemente von  $\mathcal{X}$  ausgewertet werden, was in der Regel unmöglich ist. Selbst wenn eine Lösung „geraten“ wird, ist es nicht möglich zu zeigen, dass es sich um eine Lösung handelt.

Wenn jedoch die Zielfunktion  $F$  und die zulässige Menge  $\mathcal{X}$  geeignete Eigenschaften aufweisen, ist es möglich, Minima als solche zu erkennen<sup>(c)</sup>. Für die Zielfunktion sind diese Eigenschaften in der Regel Stetigkeits- und Differenzierbarkeitsforderungen, die oftmals erfüllt sind. Weitere, wesentlich stärkere Eigenschaften sind Monotonie und Konvexität, die aber in der Regel nicht erfüllt sind. Gelten sie, so können sogar globale Minima erkannt und bestimmt werden.

### 4.2.2 Mehrdimensionale Optimierung

Bei der mehrdimensionalen Optimierung hängt die Zielfunktion  $F$  von mehreren Variablen ab. Die Anzahl der Variablen wird im Allgemeinen mit  $n$  bezeichnet. Die

<sup>(c)</sup> „erkennen“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass für einen gefundenen Wert die Minimaleigenschaft nachgewiesen werden kann.

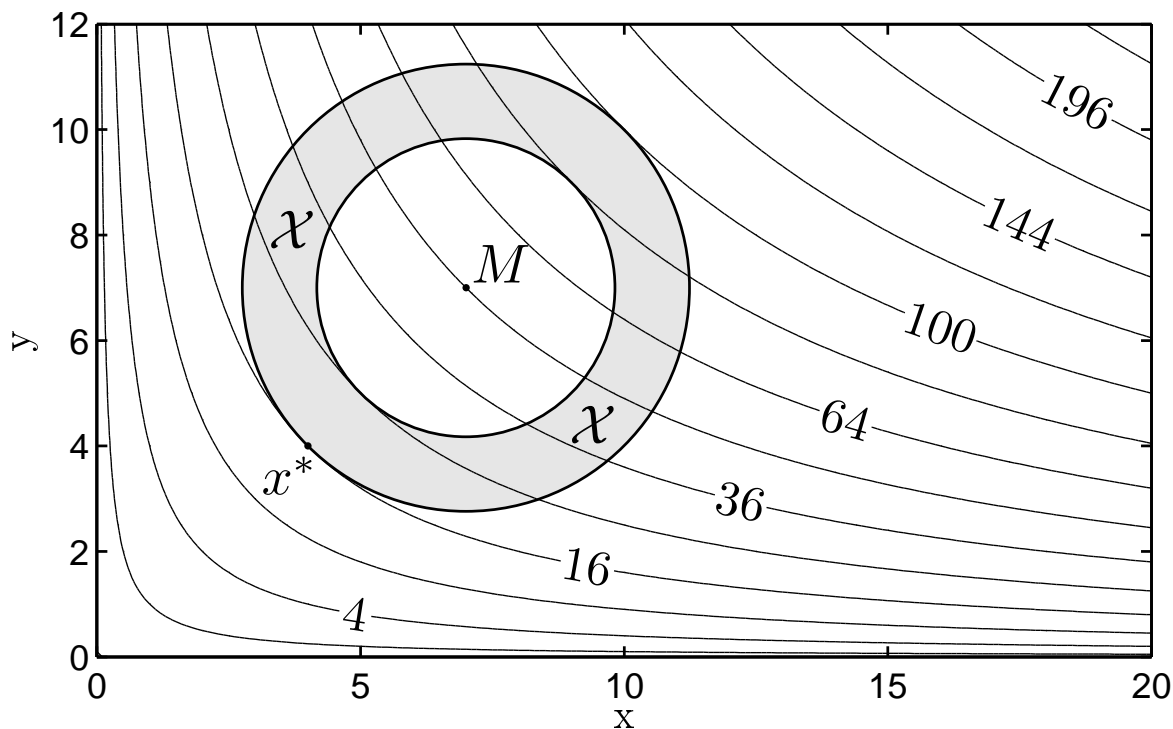


Abbildung 4.4: Mehrdimensionale Optimierung unter Nebenbedingungen

Werte der Zielfunktion  $F$  sind reelle Zahlen.

Soll die zulässige Menge für eine mehrdimensionale Aufgabe eingeschränkt werden, so ist es üblich, die Einschränkungen durch einen Satz von Ungleichungen vorzunehmen. Sei  $g$  eine vektorwertige Funktion, also  $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ , dann kann die zulässige Menge  $\mathcal{X}$  als

$$\mathcal{X} := \{x \in \mathbb{R}^n \mid g(x) \leq 0\}$$

definiert werden. Dabei ist  $g(x)$  ein Vektor mit  $m$  Komponenten und die Ungleichung  $g(x) \leq 0$  ist komponentenweise zu verstehen, das heißt, alle Komponenten von  $g(x)$  müssen kleiner oder gleich Null sein.

**Definition 8 (mehrdimensionale Optimierung)**

Gegeben seien eine Funktion  $F : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  und eine Menge  $\mathcal{X} \subset \mathbb{R}^n$ . Gesucht ist ein  $x^* \in \mathcal{X}$  mit

$$F(x^*) \leq F(x) \text{ für alle } x \in \mathcal{X} \quad (4.14)$$

**Beispiel 2**

Die Funktion  $F : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$  sei definiert als  $F(x, y) = xy$ . Sei  $g$  eine Funktion von  $\mathbb{R}^2$  nach  $\mathbb{R}^2$  mit

$$g(x, y) := \begin{pmatrix} -(x-7)^2 - (y-7)^2 + 8 \\ +(x-7)^2 + (y-7)^2 - 18 \end{pmatrix}$$



Die Menge  $\mathcal{X}$  ist somit ein Kreisring mit Mittelpunkt  $M = (7; 7)$ . In Abbildung 4.4 sind  $\mathcal{X}$  und die Isolinien der Funktion  $F$  dargestellt. Im Punkt  $x^* = (4; 4)$  nimmt  $F$  auf  $\mathcal{X}$  das Minimum an.

### 4.2.3 Unendlichdimensionale Optimierung

Bei der unendlichdimensionalen Optimierung stammen die Argumente der Zielfunktion  $F$  aus einem unendlichdimensionalen Vektorraum. Dies ist regelmäßig der Fall, wenn die Argumente von  $F$  Funktionen sind.

$$F : (\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p) \longrightarrow \mathbb{R}$$

Zur sprachlichen Trennung werden Funktionen, deren Argumente selbst Funktionen sind, als Funktionale bezeichnet. Bei der Zielfunktion für ein unendlichdimensionales Optimierungsproblem handelt es sich somit um ein Zielfunktional. Die Werte des Zielfunktional sind reelle Zahlen.

Die folgenden Beispiele zeigen einige gebräuchliche Funktionale.

**1. Integrale** Die Abbildung, die jeder Funktion  $u : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  ihr Integral zuweist, ist ein Funktional.

$$F_f(u) := \int_0^1 u(\tau) d\tau$$

**2. Maximum** Die Abbildung, die jeder Funktion  $u : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  ihr Maximum zuweist, ist ein Funktional.

$$F_{\max}(u) := \max_{\tau \in [0,1]} u(\tau)$$

**3. Bogenlängenfunktional für Kurven im Raum** Sei  $u$  die Parametrisierung einer räumlichen Kurve, also

$$u : [0; 1] \rightarrow \mathbb{R}^3, \text{ stetig differenzierbar}$$

dann kann das Bogenlängenfunktional  $L$  mit

$$L(u) := \int_0^1 \|\dot{u}(\tau)\| d\tau$$

festgelegt werden.

Die Nebenbedingungen, die an die zu optimierende Funktion  $u$  gestellt werden können, sind wesentlich komplexer als die im Fall der endlichdimensionalen Optimierung. Am gebräuchlichsten sind die folgenden Formen:

- Der Funktionenraum, aus dem  $u$  stammt, kann durch Stetigkeitsanforderungen eingeschränkt werden. Je nach Anwendung wird ein bestimmter Grad an Stetigkeit gefordert. Beispielsweise kann gefordert werden, dass  $u$  zweimal stetig differenzierbar ist.

- Der Funktionenraum kann eingeschränkt werden, indem Urbild- und Bildmenge eingeschränkt werden. Beispielsweise kann gefordert werden, dass  $u$  eine Funktion von  $[0, 1]$  nach  $[0, \infty)$  ist.
- Der Funktionenraum kann eingeschränkt werden, indem die Funktionswerte von  $u$  für bestimmte Argumente vorgegeben werden. Beispielsweise kann gefordert werden, dass  $u(0) = 1$  gilt.
- Der Funktionenraum kann durch Gleichungs- und Ungleichungsbedingungen für  $u$  eingeschränkt werden. Beispielsweise kann gefordert werden.

$$u\left(\frac{1}{4}\right) \cdot u\left(\frac{3}{4}\right) = 5 \quad \text{oder} \quad (4.15)$$

$$u(\tau) + u(1 - \tau) \leq 3 \quad (4.16)$$

- Der Funktionenraum kann durch Differentialgleichungsbedingungen und -ungleichungsbedingungen an  $u$  eingeschränkt werden. Beispielsweise kann

$$\dot{u}(\tau) = (1 + u(\tau))^2 \quad \text{oder} \quad (4.17)$$

$$\ddot{u}(\tau) \leq \sin(u(\tau)) \quad (4.18)$$

gefordert werden.

Bei den unendlichdimensionalen Optimierungsaufgaben wird zwischen Problemen mit und ohne Differentialgleichungsnebenbedingungen unterschieden. Ohne Differentialgleichungsnebenbedingungen werden sie als Probleme der Variationsrechnung bezeichnet. Probleme mit Differentialgleichungsnebenbedingungen werden als Probleme der optimalen Steuerung bezeichnet.

**Definition 9 (Variationsrechnung)**

*Gegeben sei ein Zielfunktional  $F : (\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p) \rightarrow \mathbb{R}$  und zwei Mengen  $\mathcal{M}_1 \subset \mathbb{R}^n$  und  $\mathcal{M}_2 \subset \mathbb{R}^p$  sowie eine natürliche Zahl  $r$ . Die zulässige Menge  $\mathcal{X}$  wird definiert als*

$$\mathcal{X} := \{f : \mathcal{M}_1 \rightarrow \mathcal{M}_2 \mid f \text{ ist } r\text{-mal stetig differenzierbar}\}$$

*Gesucht ist eine Funktion  $u^* \in \mathcal{X}$  mit*

$$F(u^*) \leq F(u) \quad \text{für alle } u \in \mathcal{X}$$

**Beispiel 3 (Brachistochrone)**

*Gegeben seien zwei verschiedene Punkte  $P_A$  und  $P_B$  im Anschauungsraum<sup>(d)</sup>, wobei  $P_B$  tiefer als  $P_A$  ist, aber nicht senkrecht unter  $P_A$ . Entlang welcher Kurve*

---

<sup>(d)</sup>Als Anschauungsraum wird der dreidimensionale Raum, in dem wir leben, bezeichnet. Nur in diesem Raum sind Relationen wie „über“ und „unter“ definiert.

*muss ein Massenpunkt geführt werden, damit er sich unter dem Einfluss der Schwerkraft und ohne Reibung innerhalb kürzester Zeit von  $P_A$  nach  $P_B$  bewegt?*

*Diese Aufgabe wurde bereits 1696 von Johann Bernoulli in der Zeitschrift „acta eruditorum“ gestellt. Als Ergebnis zeigt sich, dass der Punkt entlang einer Zykloiden geführt werden muss. Die Zykloide ist die Kurve, die ein Punkt auf einem Kreis beim Abrollen des Kreises beschreibt – an einem rollenden Rad könnte dieser eine Reißzwecke in der Lauffläche sein.*

#### 4.2.4 Probleme der optimalen Steuerung

Sollen zusätzlich noch Differentialgleichungs- und Differentialungleichungsnebenbedingungen gelten, so wird die Aufgabe als ein Problem der optimalen Steuerung bezeichnet. Die Bezeichnungen der Aufgabenbestandteile weichen zum Teil von denjenigen der restlichen Optimierung ab.

Die Dynamik vieler technischer Systeme lässt sich durch Systeme von Differentialgleichungen beschreiben. Auch das Systemverhalten bei äußeren Eingriffen lässt sich in der Regel mit Hilfe von Differentialgleichungen beschreiben. Die äußeren Eingriffe werden durch die Steuerfunktion  $u$  beschrieben, während der Zustand des Systems mit der Funktion  $x$  dargestellt wird. Diese Unterteilung führt zu der abweichenden Nomenklatur im Vergleich zu anderen Optimierungsproblemen.

Dieser Unterabschnitt beginnt mit einem kurzen Beispiel. Es folgen die Beschreibung der Bestandteile einer Optimalsteuerungsaufgabe und schließlich die formale Definition von Problemen der optimalen Steuerung.

##### Beispiel 4 (Portalkran)

*Margono hat sich in seiner Dissertation mit der Optimierung des Bewegungsablaufs von Portalkränen befasst (Mar04). Ziele der Optimierung sind eine möglichst schnelle und sparsame Bewegung unter der Nebenbedingung, dass die Last zum Ende der Bewegung nicht pendelt. Abbildung 4.5 zeigt einen Portalkran schematisch in der Seitenansicht mit einem Container als Last. Die Bezeichnungen sind von Margono übernommen und werden hier nicht weiter genutzt.*

*Margono berechnet den optimalen zeitlichen Verlauf des Moments für den Antriebsmotor der Laufkatze. Die Differentialgleichungsnebenbedingungen beschreiben die Dynamik des Krans. Zusammen mit dem Verlauf des Motormoments kann mit Hilfe der Differentialgleichungsnebenbedingungen der Systemzustand des Krans zu jedem Zeitpunkt berechnet werden. Die Zielfunktion ist eine gewichtete Summe aus Zeit- und Energieaufwand. Als Nebenbedingungen treten unter anderem die Anfangs- und Endlage des Containers und das maximale Motormoment auf.*

Das Problem der Berechnung von Trajektorien ist von ähnlicher Struktur wie das obige Beispiel, denn es wird auch eine Funktion gesucht, und es gelten ebenfalls Differentialgleichungsnebenbedingungen.

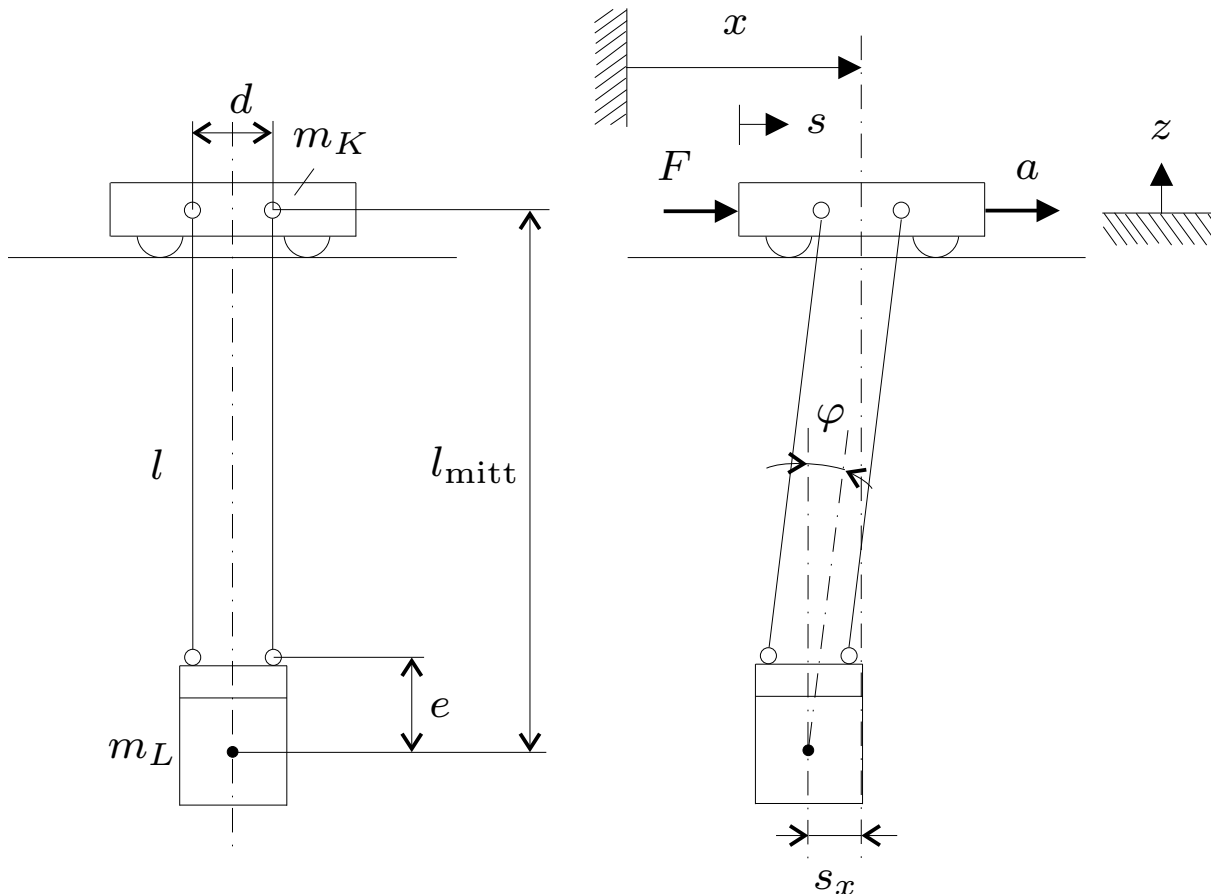


Abbildung 4.5: Portalkran nach Margono

#### 4.2.4.1 Bestandteile einer Aufgabe der optimalen Steuerung

Im Folgenden werden die Bestandteile einer Optimalsteueraufgabe beschrieben. Anhand von Beispiel 4 werden die Bestandteile konkret benannt. Die Ungleichungen sind jeweils komponentenweise zu verstehen. Der Index an der Null gibt an, wie viele Komponenten der Nullvektor hat:

$$0_m := (0, 0, \dots, 0, 0) \in \mathbb{R}^m$$

- Die **Zustandsvariablen**  $x(t)$  beschreiben den Zustand eines Systems zum Zeitpunkt  $t$ . Da der Zustand in der Regel durch mehr als eine Größe festgelegt wird, handelt es sich bei  $x(t)$  um einen Vektor mit  $n_x$  Komponenten. Beispielsweise könnte eine Komponente von  $x(t)$  die Position der Laufkatze und eine andere die Masse der Last enthalten.
- Die **Steuervariablen**  $u(t)$  beschreiben die Steuergrößen, mit denen auf das System eingewirkt wird. Auch  $u(t)$  ist im Allgemeinen ein Vektor mit  $n_u$  Komponenten. Beispielsweise kann  $u(t)$  den zeitlichen Verlauf des Motor Moments abbilden.

- Die **Differentialgleichungsnebenbedingungen**  $\dot{x} = f(t, x(t), u(t))$  beschreiben das Verhalten des zu steuernden Systems. In diesen Differentialgleichungen ist auch die Information enthalten, wie die Steuervariablen auf den Systemzustand einwirken. Beispielsweise wird hier der Zusammenhang zwischen dem Motormoment und der Laufkatzen-geschwindigkeit abgebildet. Es wird aber auch der Zusammenhang zwischen der Laufkatzen-geschwindigkeit und der Position der Laufkatze hergestellt.
- Die **reinen Zustandsbeschränkungen**  $s(t, x(t)) \leq 0_{n_s}$  begrenzen die Zustandsvariablen. Beispielsweise könnten die Position der Laufkatze durch die Länge des Auslegers und die Geschwindigkeit der Laufkatze durch Sicherheitsauflagen begrenzt sein.
- Die **reinen Steuerbeschränkungen**  $u(t) \in U$  begrenzen die Steuergrößen – es wird also gefordert, dass die Steuervariable zu jedem Zeitpunkt Element der Menge  $U$  ist. Beispielsweise könnte das Motormoment begrenzt sein.
- Die **gemischten Steuer- und Zustandsbeschränkungen**  $c(t, x(t), u(t)) \leq 0_{n_c}$  begrenzen sowohl die Zustands- als auch die Steuergrößen. Die einzelnen Ungleichungen hängen von mindestens einer Steuer- und mindestens einer Zustandsvariable ab. Mit einer gemischten Steuer- und Zustandsbeschränkung könnte beispielsweise abgebildet werden, dass das Motormoment am Ende des Auslegers in eine Richtung beschränkt ist.
- Die **Start- und Endzeit** werden mit  $t_0$  und  $t_f$  bezeichnet. Während die Startzeit stets bekannt ist, kann die Ermittlung der Endzeit Teil des Problems sein. Für das Beispiel des Portalkrans ist eine zunächst freie Endzeit sinnvoll.
- Mit den **Randbedingungen**  $\varphi(x(t_0), x(t_f)) = 0_{n_\varphi}$  können Start- und Endwerte für die Zustandsvariablen vorgegeben werden. Beispielsweise können die Randbedingungen Start- und Endposition eines Containers vorgeben. Weiter können sie festlegen, dass der Container am Ende des Transportvorgangs nicht pendelt.
- Das **Zielfunktional** hängt von den Zustandsvariablen und den Steuervariablen ab. Die folgenden verschiedenen Formen sind üblich und ineinander transformierbar:
  - Bolza-Form:  $F = \varphi_F(x(t_0), x(t_f)) + \int_{t_0}^{t_f} f_0(t, x(t), u(t)) dt$
  - Mayer-Form:  $F = \varphi_F(x(t_0), x(t_f))$
  - Lagrange-Form:  $F = \int_{t_0}^{t_f} f_0(t, x(t), u(t)) dt$
  - Tschebyscheff-Form:  $F = \max_{t \in [t_0, t_f]} h(t, x(t), u(t))$

Das Zielfunktional für das Beispiel des Portalkrans ist ein gewichtetes Mittel aus Energieaufwand und Endzeit. Es liegt daher in Bolza-Form vor. Damit wird modelliert, dass ein schneller Transport mit angemessenem Energieaufwand angestrebt wird. Weitere Anteile der Zielfunktion könnten einen erhöhten Verschleiß am Motor bei entsprechendem Anforderungsprofil berücksichtigen. Für die Berechnung von Stellvertretertrajektorien liegt ein Zielfunktional in Tschebyscheff-Form vor. Weil der verwendete Algorithmus jedoch ein Zielfunktional in Mayer-Form benötigt, wird eine entsprechende Transformation durchgeführt.

#### 4.2.4.2 Aufgabe der optimalen Steuerung

Mit den im vorigen Unterabschnitt aufgeführten Festlegungen kann eine Aufgabe der optimalen Steuerung formuliert werden:

Definition 10 (Aufgabe der optimalen Steuerung)

Finde einen Zustand  $x^* : [t_0, t_f] \rightarrow \mathbb{R}^{n_x}$  und eine Steuerung  $u^* : [t_0, t_f] \rightarrow \mathbb{R}^{n_u}$ , so dass das Zielfunktional<sup>(e)</sup>

$$F = \varphi_F(x(t_0), x(t_f)) \quad (4.19)$$

minimal wird unter den Differentialgleichungsnebenbedingungen

$$\dot{x} = f(t, x(t), u(t)) \quad (4.20)$$

den reinen Zustandsbeschränkungen

$$s(t, x(t)) \leq 0_{n_s} \quad (4.21)$$

den gemischten Steuer- und Zustandbeschränkungen

$$c(t, x(t), u(t)) \leq 0_{n_c} \quad (4.22)$$

den Randbedingungen

$$\varphi(x(t_0), x(t_f)) = 0_{n_\varphi} \quad (4.23)$$

und den Steuerbeschränkungen

$$u(t) \in U \quad (4.24)$$

Die Gleichungen (4.20), (4.22) und (4.24) gelten fast überall in  $[t_0, t_f]$ .<sup>(f)</sup> Die Gleichung (4.21) gilt für alle  $t \in [t_0, t_f]$ . Alle Funktionen seien hinreichend häufig stetig differenzierbar.

<sup>(e)</sup>Hier wird exemplarisch ein Zielfunktional in Mayer-Form gewählt.

<sup>(f)</sup>Die Gleichungen gelten also immer bis auf abzählbar viele Ausnahmestellen.

#### 4.2.4.3 Numerische Verfahren

Wie die meisten Optimierungsaufgaben sind auch Probleme der optimalen Steuerung im Allgemeinen nur numerisch zu lösen. Für Probleme der optimalen Steuerung haben sich zwei Familien von Algorithmen etabliert: die sogenannten direkten und indirekten Verfahren. Bei indirekten Verfahren werden die notwendigen Bedingungen für eine Lösung des Optimalsteuerungsproblems aufgestellt. Anschließend wird eine Funktion bestimmt, die diese notwendigen Bedingungen erfüllt. Für indirekte Verfahren ist eine intensive Analyse der Aufgabe notwendig, die in der Regel von Hand durchgeführt wird. Weiterhin muss bekannt sein, ob und gegebenenfalls wo die Lösung Schaltpunkte aufweist. Schaltpunkte können vereinfachend als Unstetigkeiten der Steuerfunktion verstanden werden. Indirekte Verfahren eignen sich daher nicht für eine automatisierte Anwendung und werden im Rahmen dieser Arbeit nicht verwendet.

Direkte Lösungsverfahren basieren auf der Parametrisierung des Optimalsteuerungsproblems und überführen es in ein endlichdimensionales Optimierungsproblem, welches mit entsprechenden Algorithmen gelöst werden soll. Folgende Bestandteile werden dazu benötigt:

**Parametrisierung der Steuerung:** Die Steuerung  $u$  wird durch eine Funktion ersetzt, die nur von endlich vielen Parametern abhängt. Beispielsweise wird  $u$  durch eine abschnittsweise konstante Funktion  $u_p$  ersetzt. Dazu werden im Zeitintervall  $[t_0, t_f]$  Teilungspunkte  $t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_{n-1} < t_n = t_f$  festgelegt. Die parametrisierte Steuerfunktion  $u_p$  wird aus einem Vektor  $\tilde{u} \in \mathbb{R}^n$  nach folgender Vorschrift gewonnen:

$$u_p(t) = \begin{cases} \tilde{u}_1 & \text{falls } t \in [t_0, t_1) \\ \tilde{u}_2 & \text{falls } t \in [t_1, t_2) \\ \vdots & \\ \tilde{u}_{n-1} & \text{falls } t \in [t_{n-2}, t_{n-1}) \\ \tilde{u}_n & \text{falls } t \in [t_{n-1}, t_n] \end{cases} \quad (4.25)$$

**Diskretisierung der Differentialgleichung:** Die Differentialgleichung  $\dot{x} = f(t, (x), u(t))$  wird numerisch gelöst, zum Beispiel mit einem Runge-Kutta-Verfahren(SK06; Nza01).

**Optimierungsverfahren:** Nach der Parametrisierung und Diskretisierung entsteht ein nichtlineares Optimierungsproblem, das mit bekannten Verfahren – etwa SQP<sup>(9)</sup> – gelöst wird(Nza01).

Mit diesen Komponenten besteht der Ablauf für ein direktes Lösungsverfahren vereinfacht aus folgenden Schritten:

<sup>(9)</sup>SQP: Sequential Quadratic Programming: Das Optimierungsproblem wird auf eine Folge quadratischer Probleme zurückgeführt.

1. Transformation des Problems in ein Problem der Mayer-Form (siehe Seite 49) mit fester Endzeit  $t_f$ .
2. Festlegung der Teilungspunkte  $t_i$  und damit der Dimension des Vektors  $\tilde{u}$ .
3. Bestimmung eines Startwerts für  $\tilde{u}$ .
4. Numerisches Lösen der Differentialgleichung  $\dot{x} = f(t, x(t), u(t))$
5. Bestimmung des Wertes der Zielfunktion  $F$ .
6. Je nach verwendetem Optimierungsverfahren Bestimmung des Gradienten von  $F$ . Dazu weitere Ausführungen der Schritte 4 und 5.
7. Klärung, ob die berechnete Lösung bereits den gesetzten Qualitätsanforderungen entspricht. Falls „JA“ weiter bei Schritt 8, sonst Bestimmung einer neuen Näherungslösung  $\tilde{u}$  durch das Optimierungsverfahren und weiter bei Schritt 4.
8. Rücktransformation der Lösung.

Für die Berechnungen im Rahmen dieser Arbeit wurde das Programmpaket OC-ODE<sup>(h)</sup> unter Fortran 77 benutzt (Ger06a). Gerdt's hat freundlicherweise einige Anpassungen vorgenommen und die Stabilität dadurch deutlich erhöht. Das alternativ verfügbare Programm NUDOCCCS<sup>(i)</sup> (Büs96) funktioniert ähnlich (Ros05) und hätte ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit verwendet werden können. NUDOCCCS nutzt allerdings als SQP-Verfahren die kostenpflichtige Fortran-Routine E04UCF aus der NAG-Bibliothek. Da durch das eventuell bessere SPQ-Verfahren lediglich kürzere Rechenzeiten zu erwarten waren, fiel die Wahl auf das OC-ODE Paket. Ein ausführlicher Vergleich der beiden Programme steht noch aus.

### 4.2.5 Lokale und globale Minima

Die Definitionen der verschiedenen Optimierungsaufgaben verlangt von den Lösungen  $x^*$  beziehungsweise  $x^*$  und  $u^*$ , dass die Zielfunktion für die Lösungen das Minimum annimmt. Das bedeutet, dass der Wert der Zielfunktion für *alle* zulässigen Punkte nicht kleiner als eben dieses Minimum sein darf. Eine Lösung mit dieser Eigenschaft wird als globales Minimum bezeichnet. Es gibt kein numerisches Verfahren, das ein globales Minimum ohne weitere, schwer zu erfüllende Voraussetzungen berechnen kann. Die numerischen Verfahren können lediglich feststellen, dass sich in einer Umgebung um den Lösungspunkt kein Punkt befindet, für den die Zielfunktion einen kleineren Wert annimmt. Die Lösung ist innerhalb dieser Umgebung minimal und wird daher als lokales Minimum bezeichnet.

---

<sup>(h)</sup>OC-ODE: Optimal Control of Ordinary Differential Equations

<sup>(i)</sup>NUDOCCCS: Numerical Discretisationmethod for Optimal Controlproblems with Constraints in Controls and States



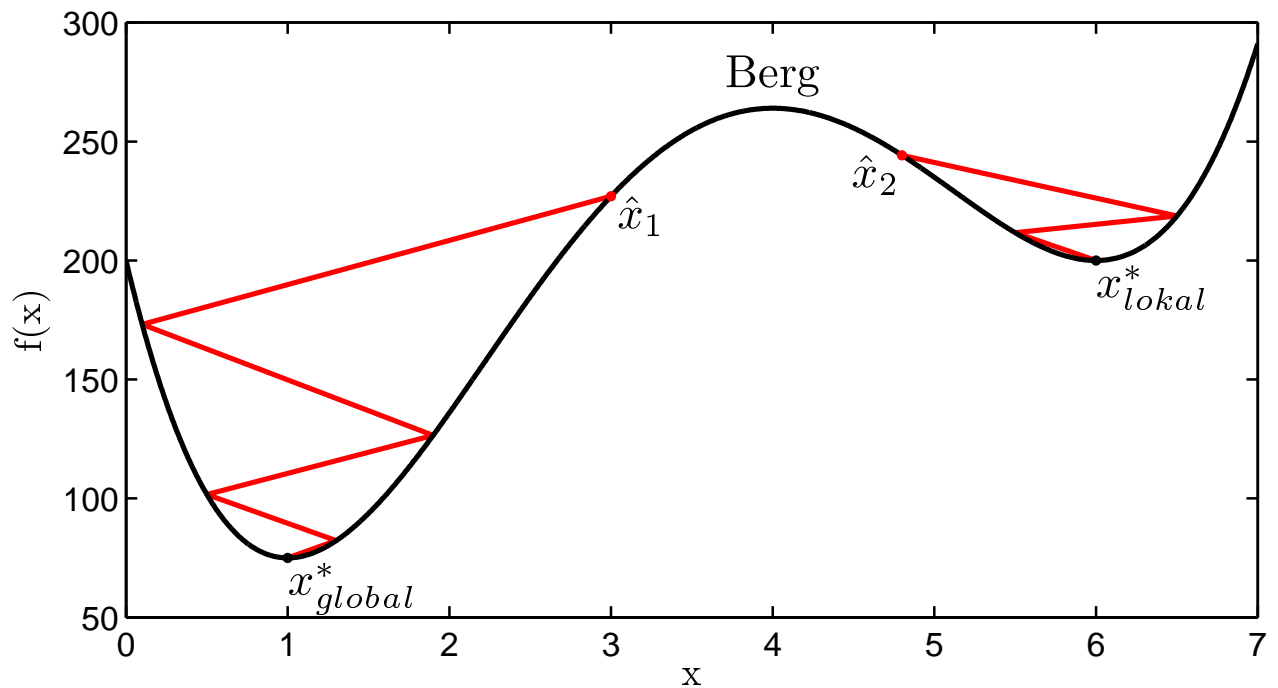


Abbildung 4.6: Beispielfunktion mit einem lokalen und einem globalen Minimum

Abbildung 4.6 zeigt eine Funktion  $f$  mit einem globalen Minimum  $x_{global}^*$  und einem lokalen Minimum  $x_{lokal}^*$ . Würde ein Optimierungsverfahren mit der Startlösung  $\hat{x}_2$  starten, so könnte sich die Näherungslösung entlang der roten Linie entwickeln und im lokalen Minimum  $x_{lokal}^*$  enden. Ein Startwert  $\hat{x}_1$  im linken „Tal“ könnte sich zur globalen Lösung  $x_{global}^*$  entwickeln. Die gebräuchlichen Abstiegsverfahren können den „Berg“ in der Mitte im Allgemeinen nicht überwinden und finden lediglich das Minimum in ihrem „Tal“. Auch bei der mehrdimensionalen Optimierung können in der Regel nur lokale Minima berechnet werden.

Für die Berechnungen von Stellvertretertrajektorien sind globale Minima notwendig. Für eine Optimierungsaufgabe ohne spezielle Voraussetzungen ist es jedoch unmöglich, für ein gegebenes Minimum zu entscheiden, ob es lokal oder global ist. Es kann insbesondere auch keine Warnung vor einem lokalen Minimum erzeugt werden. Für die Situationsbewertung mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien stellt dieser Sachverhalt das zentrale Problem dar, denn lokale Minima führen zu einer ungünstigeren Situationsbewertung und damit eventuell zu einer vorzeitigen Auslösung der automatischen Notbremsung. Gegenstand weiterer Forschungsarbeiten muss es sein, Fehlauflösungen dieser Art zu verhindern. Falls Fehlauflösungen nicht verhindert werden können, so müssen sie doch auf ein vertretbares Maß reduziert werden.



## **5 Kollisionsvorhersage mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien**

Die theoretischen Grundlagen des vorigen Kapitels werden nun angewendet, um Trajektorien für die Kollisionsvorhersage zu berechnen. Im ersten Abschnitt werden die Zusammenhänge des Einspurmodells und des Reifenmodells als Differentialgleichungsnebenbedingungen für ein Problem der optimalen Steuerung aufbereitet. Es folgt ein Abschnitt mit algorithmischen Anpassungen, die die numerische Stabilität erhöhen. Der letzte Abschnitt stellt dar, wie die vorab beschriebene Berechnung von Stellvertretertrajektorien zur Bewertung von Verkehrssituationen genutzt wird.

### **5.1 Stellvertretertrajektorienberechnung als Problem der optimalen Steuerung**

Die Stellvertretertrajektorie, die in Abschnitt 3.1 definiert wurde, soll numerisch bestimmt werden. Mit Hilfe des Einspurmodells (Abschnitt 4.1) ergibt sich aus den Verläufen der Lenkrate und der Bremskraft zusammen mit dem Anfangszustand eine Trajektorie. Damit das Einspurmodell angewendet werden kann, müssen zusätzlich zur Schwerpunktposition noch der Gierwinkel, die Gierrate, die Geschwindigkeit, der Schwimmwinkel und der Lenkwinkel berücksichtigt werden. Die Lenkrate und die Bremskraft sind die Eingangsgrößen des Einspurmodells und werden im Zusammenhang mit Problemen der optimalen Steuerung als Steuervariablen bezeichnet. Die Ausgangsgrößen des Einspurmodells werden als Zustandsvariablen bezeichnet. Es ist üblich, die Steuervariablen mit  $u_1, u_2, \dots$  und die Zustandsvariablen mit  $x_1, x_2, \dots$  zu benennen. Der Algorithmus zur Lösung von Problemen der optimalen Steuerung wird die Steuervariablen so lange variieren, bis das Qualitätsfunktional einen minimalen Wert annimmt. Er wird auf diese Weise eine Trajektorie finden, die kollisionsfrei ist, die dem Einspurmodell genügt und deren längster Beschleunigungsvektor eine minimale Länge aufweist. Er wählt somit aus unendlich vielen Trajektorien eine Stellvertretertrajektorie aus.

Die Modellierung des Fahrzeugumfelds ist an die Verkehrssituation angepasst, die im Fahrversuch untersucht wird (Abbildung 5.1). Insbesondere werden hier keine mobilen Hindernisse berücksichtigt. Stattdessen wird nur ein einzelnes, stationäres Hindernis betrachtet, welches sich auf einer geraden Fahrbahn befindet. Ferner ist die Kontur des Hindernisses als Rechteck vorgegeben. Für die Berechnung von Stellvertretertrajektorien in beliebigen Verkehrssituationen muss das Verfahren erweitert werden. Dabei muss unter anderem berücksichtigt werden, wie sich die mobilen Hindernisse bewegen werden. Diese Prädiktion ist mit großen Unsicherheiten verbunden, da im Allgemeinen unbekannt ist, welche Ziele eventuell involvierte Personen – auch als Fahrzeugführer – verfolgen.

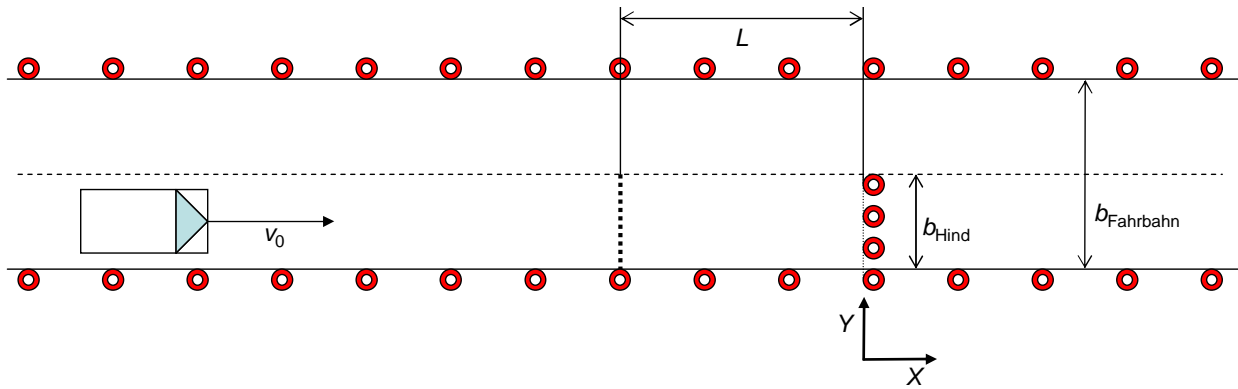


Abbildung 5.1: Verkehrssituation

Der Rechenaufwand für die Bestimmung von Stellvertretertrajektorien in beliebigen Verkehrssituationen wird wesentlich höher sein als für die hier untersuchte Verkehrssituation.

In diesem Abschnitt wird die Bedeutung der einzelnen Steuer- und Zustandsvariablen festgelegt. Ferner werden Gleichungen und Ungleichungen aufgestellt, die dafür sorgen, dass die Trajektorien fahrdynamisch realisierbar und kollisionsfrei sind. Die Darstellung der Gleichungen und Ungleichungen orientiert sich dabei an der Form, in welcher die Aufgabe dem Lösungsalgorithmus übergeben wird. Diese Form wurde auch für die allgemeine Darstellung von Problemen der optimalen Steuerung in Abschnitt 4.2.4.2 gewählt. Die Gleichungen, die sich aus dem Einspurmodell ergeben, sind Differentialgleichungen. Die Größen, die im Weiteren verwendet werden, teilen sich in drei Gruppen auf:

- Steuervariablen  $u_1, u_2$ , die vom Algorithmus variiert werden
- Zustandsvariablen  $x_1, x_2, \dots, x_8$ , die sich aus der Wahl der Steuervariablen ableiten
- Parameter (alle anderen Symbole), die eine konstante Größe beschreiben (beispielsweise den Radstand)

Durch die unterschiedliche Benennung von Steuervariablen, Zustandsvariablen und Parametern kann gut erkannt werden, welche Rollen die Größen für das Optimierungsverfahren spielen. Die inhaltliche Verständlichkeit der Gleichungen leidet jedoch unter dieser Benennung. Deswegen wird jeweils als Fußnote die Bedeutung der Zustands- und Steuervariablen wiederholt.

Die Stellvertretertrajektorie wurde in Abschnitt 3.1 als eine spezielle Trajektorie aus der Menge  $\mathcal{M}_V$  aller kollisionsfreien und fahrdynamisch realisierbaren Trajektorien definiert. Algorithmisch lässt sich im Allgemeinen nicht feststellen, ob  $\mathcal{M}_V$  die leere Menge ist. Im Folgenden wird eine Stellvertretertrajektorie daher aus einer größeren Menge bestimmt, die in der Regel nicht leer ist: Obwohl es fahrdynamisch unmöglich ist, werden beliebig starke Verzögerungen zugelassen. Die übertragbaren Querkräfte bleiben hingegen beschränkt (durch die Pacejka

Magic Formula). Die Trajektorien, in deren Verlauf stärker gebremst wurde, als es fahrdynamisch möglich ist, können anhand ihres Wertes des Qualitätsfunktional  $F$  erkannt werden. Der spätere Vergleich des Wertes der Bewertungsfunktion  $G$  mit dem Schwellwert  $\alpha_{Schwell}$  deckt diese Fälle ab. Dieses Vorgehen führt dazu, dass für fast jede Verkehrssituation eine Stellvertretertrajektorie bestimmt werden kann. Insbesondere ist es stets möglich, eine zulässige Startlösung für den Optimierungsalgorithmus zu finden.

### 5.1.1 Zustandsvariablen

Um das Fahrzeug mit dem in Abschnitt 4.1.1 angegeben Einspurmodell abbilden zu können, werden folgende Zustandsvariablen benötigt:

$x_1$	X-Position des Schwerpunkts	$x$
$x_2$	Y-Position des Schwerpunkts	$y$
$x_3$	Gierwinkel	$\psi$
$x_4$	Gierrate	$\dot{\psi}$
$x_5$	Schwimmwinkel	$\beta$
$x_6$	Geschwindigkeit	$v$
$x_7$	Lenkwinkel	$\delta$
$x_8$	Hilfsgröße	

Dabei sind die Zustandsvariablen  $x_1$  bis  $x_8$  Funktionen der Zeit. Gilt eine Aussage unabhängig von der Zeit, so wird auf die explizite Angabe der Zeit verzichtet. So ist beispielsweise die Aussage

$$x_8 \geq 0$$

gleichbedeutend mit

$$x_8(t) \geq 0 \text{ für alle } t$$

Die Variable  $x_8$  wird bei der notwendigen Transformation des Zielfunktional in die Mayer-Form, die für die Berechnungen geeignet ist, eingeführt. Weitere Bedingungen entstehen bei der Transformation:

- Eine Differentialgleichungsnebenbedingung (Abschnitt 5.1.7) sorgt dafür, dass  $x_8$  eine konstante Funktion ist.
- Eine Nebenbedingung (Abschnitt 5.1.8) sorgt dafür, dass  $x_8$  größer oder gleich ist, als die Länge des längsten Beschleunigungsvektors.
- Das Zielfunktional (Abschnitt 5.1.9) sorgt dafür, dass  $x_8$  nicht größer als die Länge des längsten Beschleunigungsvektors ist. Zusammen mit der vorigen Bedingung folgt daraus, dass  $x_8$  genau die Länge des längsten Beschleunigungsvektors erhält. Ferner sorgt das Zielfunktional dafür, dass das Optimierungsverfahren versucht, die Länge des längsten Beschleunigungsvektors zu minimieren.

### 5.1.2 Steuervariablen

Die Steuervariablen werden festgelegt als

$$\begin{array}{ll} u_1 & \text{Bremskraft } F_B \\ u_2 & \text{Lenkrate } \dot{\delta} \end{array}$$

Die Steuervariablen sind wie die Zustandsvariablen Funktionen der Zeit. Als Bremskraft wird hier die Kraft verstanden, die entlang der Fahrzeuglängsachse entgegen der Vorwärtsrichtung wirkt und so eine Verzögerung des Fahrzeugs verursacht. Die Bremskraft wird über alle vier Räder übertragen. Alternativ zur Bremskraft hätte auch eine andere längsdynamische Größe – beispielsweise die Geschwindigkeit oder der Bremsruck – verwendet werden können. Die Verwendung der Bremskraft hat sich aber als die numerisch stabilste Variante erwiesen.

Die Lenkrate  $\dot{\delta}$  bezieht sich auf den Vorderradeinschlagwinkel  $\delta$  und nicht auf den Lenkradwinkel. Anstelle der Lenkrate  $\dot{\delta}$  könnte auch mit dem Lenkwinkel  $\delta$  oder der Lenkbeschleunigung  $\ddot{\delta}$  gearbeitet werden. Die Verwendung der Lenkrate hat sich als stabilste Variante herausgestellt.

Eine gute Wahl der Steuervariablen kann nur teilweise durch theoretische Überlegungen untermauert werden. Viele Erkenntnisse wurden experimentell gewonnen.

### 5.1.3 Steuerbeschränkungen

Die Steuervariablen werden so wenig wie möglich eingeschränkt, weil sich jede zusätzliche Steuerbeschränkung negativ auf die numerische Stabilität auswirkt. Die Steuerbeschränkung

$$-u_1 \leq 0 \tag{5.1}$$

sorgt dafür, dass nur nichtnegative Bremskräfte auftreten. Negative Bremskräfte – also Kräfte, die zu einer Beschleunigung führen – werden ausgeschlossen, da sie für die betrachtete Verkehrssituation keinen Nutzen versprechen. Ferner wäre ihre Modellierung aufwendiger, weil die Antriebsart – Front-, Heck- oder Allradantrieb – berücksichtigt werden müsste.

### 5.1.4 Modellierung der Fahrzeugkontur

Die errechneten Trajektorien sollen kollisionsfrei sein. Um eine gegebene Trajektorie schnell auf Kollisionsfreiheit zu überprüfen, wird die Fahrzeugkontur durch sieben einzelne Punkte modelliert. Nur für diese sieben Punkte wird überprüft, ob das Fahrzeug mit dem Hindernis oder dem Fahrbahnrand kollidiert.

In Abbildung 5.2 sind der Schwerpunkt  $M$  und die sieben Konturpunkte  $P_1$  bis  $P_7$  dargestellt. Die eingezeichneten Längen haben folgende Bedeutungen:

- $b$      Breite des Fahrzeugs
- $d_h$    Abstand der hinteren Stoßstange zum Schwerpunkt
- $d_s$    Abstand der vorderen Stoßstange zum Schwerpunkt
- $d_v$    verkürzter Abstand der vorderen Stoßstange zum Schwerpunkt

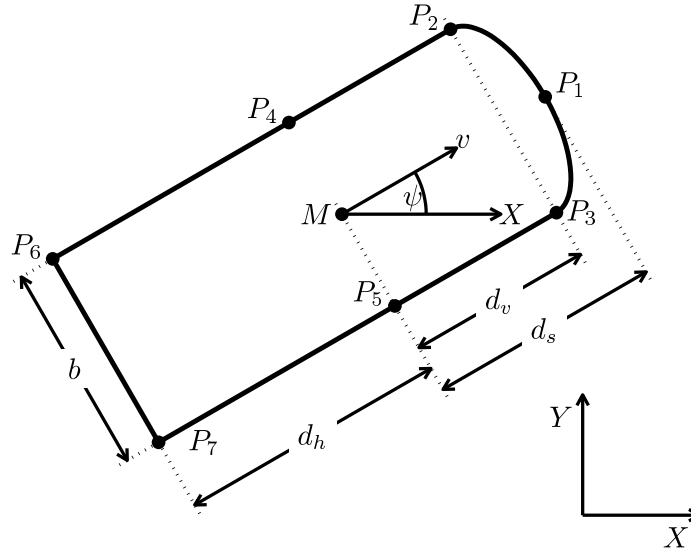


Abbildung 5.2: Kontur des Fahrzeugs

Mit Hilfe des verkürzten Abstands wird eine abgerundete Fahrzeugfront modelliert. Die Punkte  $P_1$  bis  $P_7$  können wie folgt berechnet werden<sup>(a)</sup>:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \left( x_1 + d_s \cos(x_3), x_2 + d_s \sin(x_3) \right) \\
 P_2 &= \left( x_1 + d_v \cos(x_3) - \frac{b}{2} \sin(x_3), x_2 + d_v \sin(x_3) + \frac{b}{2} \cos(x_3) \right) \\
 P_3 &= \left( x_1 + d_v \cos(x_3) + \frac{b}{2} \sin(x_3), x_2 + d_v \sin(x_3) - \frac{b}{2} \cos(x_3) \right) \\
 P_4 &= \left( x_1 - \frac{b}{2} \sin(x_3), x_2 + \frac{b}{2} \cos(x_3) \right) \\
 P_5 &= \left( x_1 + \frac{b}{2} \sin(x_3), x_2 - \frac{b}{2} \cos(x_3) \right) \\
 P_6 &= \left( x_1 - d_h \cos(x_3) - \frac{b}{2} \sin(x_3), x_2 - d_h \sin(x_3) + \frac{b}{2} \cos(x_3) \right) \\
 P_7 &= \left( x_1 - d_h \cos(x_3) + \frac{b}{2} \sin(x_3), x_2 - d_h \sin(x_3) - \frac{b}{2} \cos(x_3) \right)
 \end{aligned}$$

### 5.1.5 Modellierung der Fahrbahn

Die Fahrbahn soll einer geraden, zweispurigen Landstraße entsprechen. Die Fahrbahnbreite  $b_{\text{Fahrbahn}}$  wird deshalb auf 7m festgelegt. Abbildung 5.3 zeigt, wie die Fahrbahn in ein ebenes Koordinatensystem eingebettet wird. Die Fahrbahnrande sind parallel zur X-Achse ausgerichtet und der rechte Fahrbahnrand verläuft durch den Ursprung des Koordinatensystems.

Die Forderung, dass das Fahrzeug die Fahrbahn nicht verlässt, wird während der Trajektorienberechnung dadurch sichergestellt, dass keiner der sieben Konturpunkte die Fahrbahn verlässt. Weil die Fahrbahn in X-Richtung ausgerichtet ist, müssen lediglich Ungleichungsbedingungen an die Y-Komponenten der Punkte gestellt werden. Auf die Überprüfung der Punkte  $P_4$  und  $P_5$  kann verzichtet

<sup>(a)</sup>  $x_1$ : X-Position,  $x_2$ : Y-Position,  $x_3$ : Gierwinkel  $\psi$

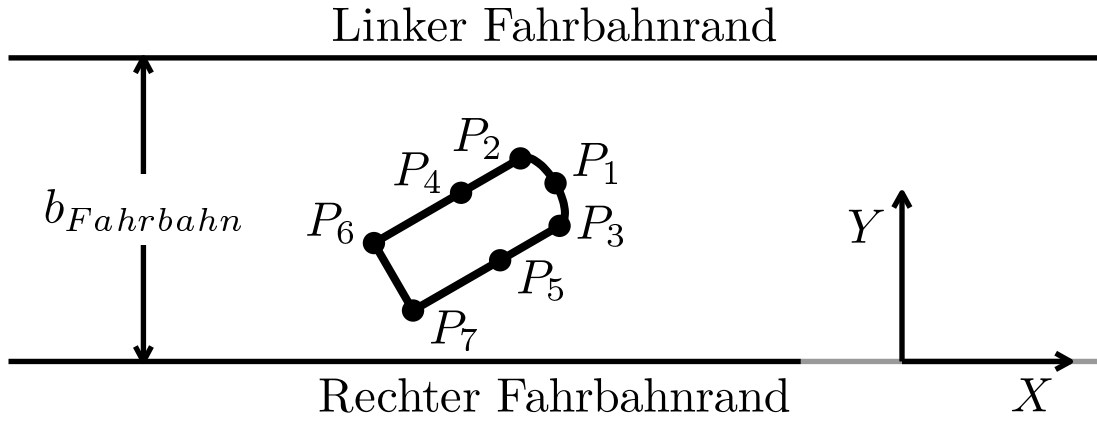


Abbildung 5.3: Fahrbahn

werden, weil sie nur dann die Fahrbahn verlassen können, wenn auch einer der Punkte  $P_1, P_2, P_3, P_6$  oder  $P_7$  die Fahrbahn verlässt.

$$0 \leq P_{i,y} \leq b_{Fahrbahn} \quad \text{für } i \in \{1, 2, 3, 6, 7\} \quad (5.2)$$

Die Ungleichungskette (5.2) ist äquivalent zu den beiden Ungleichungen

$$P_{i,y} - b_{Fahrbahn} \leq 0 \quad \text{und} \quad (5.3)$$

$$-P_{i,y} \leq 0 \quad (5.4)$$

Die Ungleichungen für die Punkte  $P_i$  ( $i \in \{1, 2, 3, 6, 7\}$ ) werden durch Einsetzen der Gleichungen aus Abschnitt 5.1.4 zu folgenden Zustandsungleichungen<sup>(b)</sup>:

$$\begin{aligned}
 & + \left( x_2 + d_s \sin(x_3) \right) - b_{Fahrbahn} \leq 0 \\
 & - \left( x_2 + d_s \sin(x_3) \right) \leq 0 \\
 & + \left( x_2 + d_v \sin(x_3) + \frac{b}{2} \cos(x_3) \right) - b_{Fahrbahn} \leq 0 \\
 & - \left( x_2 + d_v \sin(x_3) + \frac{b}{2} \cos(x_3) \right) \leq 0 \\
 & + \left( x_2 + d_v \sin(x_3) - \frac{b}{2} \cos(x_3) \right) - b_{Fahrbahn} \leq 0 \\
 & - \left( x_2 + d_v \sin(x_3) - \frac{b}{2} \cos(x_3) \right) \leq 0 \\
 & + \left( x_2 - d_h \sin(x_3) + \frac{b}{2} \cos(x_3) \right) - b_{Fahrbahn} \leq 0 \\
 & - \left( x_2 - d_h \sin(x_3) + \frac{b}{2} \cos(x_3) \right) \leq 0 \\
 & + \left( x_2 - d_h \sin(x_3) - \frac{b}{2} \cos(x_3) \right) - b_{Fahrbahn} \leq 0 \\
 & - \left( x_2 - d_h \sin(x_3) - \frac{b}{2} \cos(x_3) \right) \leq 0
 \end{aligned} \quad (5.5)$$

<sup>(b)</sup>  $x_2$ : Y-Position,  $x_3$ : Gierwinkel  $\psi$



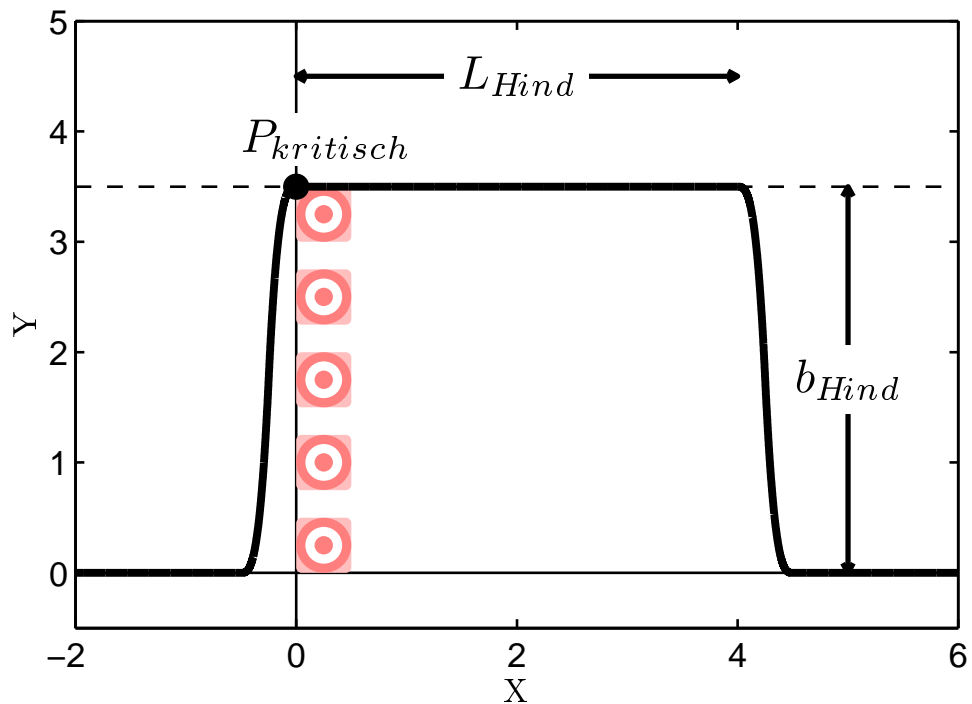


Abbildung 5.4: Kontur des Hindernisses

Die vorgenommene Modellierung der Fahrbahn ist speziell auf die gewählte Verkehrssituation ausgerichtet. Allgemeine Verkehrssituationen erfordern eine komplexere Modellierung. Die Fahrbahnränder müssten in geeigneter Form – beispielsweise als Kantenzug oder als Klotoidenzug<sup>(c)</sup> – dargestellt werden, um ihre Krümmung abzubilden. Die obigen Ungleichungen müssten entsprechend angepasst werden.

### 5.1.6 Modellierung des Hindernisses

Das Hindernis blockiert die rechte Fahrspur vollständig. Im Fahrversuch, der in Kapitel 6 beschrieben wird, wird dies durch eine Reihe von Pylonen erreicht. Für die Berechnungen von Stellvertretertrajektorien wurde das Hindernis durch einen Quader mit abgerundeten Kanten ersetzt. Die im Vergleich zur Pylonenreihe größere Ausdehnung in Fahrtrichtung ist notwendig, damit das Hindernis bei der Berechnung nicht „übersehen“ werden kann: Nur die Punkte der Trajektorien, die bei der Diskretisierung entstehen, sollen auf eine Kollision mit dem Hindernis überprüft werden. Bei kleinen Hindernissen ist es möglich, dass ein Punkt vor und einer hinter dem Hindernis liegt und die Trajektorie unbemerkt durch das Hindernis hindurchführt.

Abbildung 5.4 zeigt die Kontur des Hindernisses. Es ist so positioniert, dass der kritische Punkt  $P_{kritisch}$  auf der Y-Achse liegt. Der kritische Punkt ist der Punkt, an dem das Hindernis in Fahrtrichtung zuerst seine maximale Ausdehnung annimmt.

<sup>(c)</sup>Aneinanderreihung von Klotoidenabschnitten

Die Abrundung wird so vorgenommen, dass die Hinderniskontur eine differenzierbare Funktion wird. Dies hat sich bei den Berechnungen als vorteilhaft erwiesen. Bei dem vorher eingesetzten rechteckigen Hindernis ist es vereinzelt dazu gekommen, dass die Punkte der Trajektorie am kritischen Punkt  $P_{kritisch}$  „hängen geblieben“ sind: Während der Optimierung konnten Punkte, die vor dem Hindernis lagen vom Algorithmus nicht so verschoben werden, dass sie anschließend neben dem Hindernis lagen. Die Kontur des Hindernisses wird durch die Funktion

$$h(x) := \begin{cases} 0 & \text{für } x \leq -0,5m \\ b_{Hind} \cdot 32 (x + 0,5)^3 & \text{für } -0,5m < x \leq -0,25m \\ b_{Hind} \cdot (1 + 32x^3) & \text{für } 0,25m < x \leq 0m \\ b_{Hind} & \text{für } 0m < x \leq L_{Hind} \\ b_{Hind} \cdot (1 - 32(x - L_{Hind})^3) & \text{für } L_{Hind} < x \leq L_{Hind} + 0,25m \\ b_{Hind} \cdot (-32)(x - 0,5 - L_{Hind})^3 & \text{für } L_{Hind} + 0,25m < x \leq L_{Hind} + 0,5m \\ 0 & \text{für } L_{Hind} + 0,5m < x \end{cases}$$

beschrieben. Es handelt sich hierbei um einen Spline zweiten Grades. Die Übergänge sind stetig und stetig differenzierbar. Die Konturbeschreibung mit Hilfe eines Splines hat sich als angemessene Modellierung des Hindernisses ergeben. Ein Versuch mit die Kontur mit Hilfe von trigonometrischen Funktionen darzustellen hat weder für die Stabilität noch für die Rechenzeiten zu wesentlichen Veränderungen geführt.

Das modellierte Hindernis führt auf eine Reihe von Zustandsbeschränkungen. Für die sieben Konturpunkte aus Abschnitt 5.1.4 wird gefordert, dass sie oberhalb des Hindernisses liegen, also:

$$\begin{aligned} h(P_{ix}) &\leq P_{iy} \\ \Leftrightarrow h(P_{ix}) - P_{iy} &\leq 0 \quad \text{für } i \in \{1, 2, \dots, 7\} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Das Einsetzen der Gleichungen aus Abschnitt 5.1.4 führt auf die folgenden Zustandsungleichungen<sup>(d)</sup>:

$$\begin{aligned} h\left(x_1 + d_s \cos(x_3)\right) - \left(x_2 + d_s \sin(x_3)\right) &\leq 0 \\ h\left(x_1 + d_v \cos(x_3) - \frac{b}{2} \sin(x_3)\right) - \left(x_2 + d_v \sin(x_3) + \frac{b}{2} \cos(x_3)\right) &\leq 0 \\ h\left(x_1 + d_v \cos(x_3) + \frac{b}{2} \sin(x_3)\right) - \left(x_2 + d_v \sin(x_3) - \frac{b}{2} \cos(x_3)\right) &\leq 0 \\ h\left(x_1 - \frac{b}{2} \sin(x_3)\right) - \left(x_2 + \frac{b}{2} \cos(x_3)\right) &\leq 0 \\ h\left(x_1 + \frac{b}{2} \sin(x_3)\right) - \left(x_2 - \frac{b}{2} \cos(x_3)\right) &\leq 0 \\ h\left(x_1 - d_h \cos(x_3) - \frac{b}{2} \sin(x_3)\right) - \left(x_2 - d_h \sin(x_3) + \frac{b}{2} \cos(x_3)\right) &\leq 0 \\ h\left(x_1 - d_h \cos(x_3) + \frac{b}{2} \sin(x_3)\right) - \left(x_2 - d_h \sin(x_3) - \frac{b}{2} \cos(x_3)\right) &\leq 0 \end{aligned} \quad (5.7)$$

<sup>(d)</sup> $x_1$ : X-Position,  $x_2$ : Y-Position,  $x_3$ : Gierwinkel  $\psi$

Die Modellierung des Hindernisses ist – genau wie die Modellierung der Fahrbahn – auf die spezielle Verkehrssituation ausgerichtet. Bei der Modellierung anderer Hindernisse sollte die stetige Differenzierbarkeit der Kontur angestrebt werden, weil die numerischen Verfahren unter dieser Bedingung stabiler funktionieren.<sup>(e)</sup> Bewegte Hindernisse – wie beispielsweise andere Fahrzeuge und Fußgänger – benötigen zusätzlich ein Dynamikmodell.

### 5.1.7 Modellierung der Fahrzeugdynamik

Als Fahrzeugmodell wird das Einspurmodell gewählt, wobei die Reifen mit Hilfe der Pacejka Magic Formula modelliert werden. Das Einspurmodell wurde gewählt, weil es das Modell mit der geringsten Komplexität ist, welches ein Schleudern des Fahrzeugs abbilden kann. Die Pacejka Magic Formula wurde gewählt, weil die abzubildenden Fahrmanöver im Grenzbereich stattfinden, und die Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen Schräglaufwinkel und Seitenkraft daher nicht gerechtfertigt ist.

Mit der Festlegung der Zustandsvariablen in Abschnitt 5.1.1 und den Differentialgleichungen aus den Abschnitten 4.1.1 und 4.1.2 ergeben sich die folgenden Differentialgleichungsnebenbedingungen<sup>(f)</sup> :

$$\dot{x}_1 = x_6 \cos(x_3 - x_5) \quad (5.8)$$

$$\dot{x}_2 = x_6 \sin(x_3 - x_5) \quad (5.9)$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \quad (5.10)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{F_{sv} \cdot l_v \cos(x_7) - F_{sh} \cdot l_h + F_{uv} \cdot l_v \cdot \sin(x_7)}{I_{zz}} \quad (5.11)$$

$$\dot{x}_5 = x_4 - \frac{F_{uh} \sin(x_5) + F_{uv} \sin(x_7 + x_5) + F_{sh} \cos(x_5) + F_{sv} \cos(x_7 + x_5)}{m \cdot x_6} \quad (5.12)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{F_{uh} \cos(x_5) + F_{uv} \cos(x_7 + x_5) - F_{sh} \sin(x_5) - F_{sv} \sin(x_7 + x_5)}{m} \quad (5.13)$$

$$\dot{x}_7 = u_2 \quad (5.14)$$

$$\dot{x}_8 = 0 \quad (5.15)$$

Die Seiten- und Umfangskräfte hängen von den Schräglaufwinkeln und der Bremskraft ab. Die Schräglaufwinkel ergeben sich nach den Gleichung (4.1) und (4.2) auf Seite 39 aus der Geschwindigkeit, dem Schwimmwinkel, der Gierrate und dem Lenkwinkel. Die Umfangskräfte  $F_{uv}$  und  $F_{uh}$  hängen somit von  $u_1$  und die Seitenkraft  $F_{sv}$  von  $u_2$  ab.

Die letzte Differentialgleichung sorgt dafür, dass  $x_8$  konstant ist (vgl. Abschnitt 5.1.1).

<sup>(e)</sup>experimentell ermittelte Aussage

<sup>(f)</sup> $x_1$ : X-Position,  $x_2$ : Y-Position,  $x_3$ : Gierwinkel  $\psi$ ,  $x_4$ : Gierrate  $\dot{\psi}$ ,  $x_5$ : Schwimmwinkel  $\beta$ ,  $x_6$ : Geschwindigkeit  $v$ ,  $x_7$ : Lenkwinkel  $\delta$ ,  $x_8$ : Hilfsgröße,  $u_1$ : Bremskraft  $F_B$ ,  $u_2$ : Lenkrate  $\dot{\delta}$

### 5.1.8 Weitere Nebenbedingungen

Die Zustandsvariable  $x_8$  soll während der Berechnung einen Wert haben, der stets größer ist als der maximale Betrag der Beschleunigungsvektoren (vgl. Abschnitt 5.1.1).  $x_8$  ist dadurch eine obere Schranke für die Längen der Beschleunigungsvektoren.

$$\|a\| \leq x_8 \quad (5.16)$$

Aus den Zustandsvariablen lässt sich die Länge des Beschleunigungsvektors ermitteln:

$$\|a\| = \sqrt{(\ddot{x}_1)^2 + (\ddot{x}_2)^2} \quad (5.17)$$

Die zweiten Ableitungen von  $x_1$  und  $x_2$  können aus den vorgegebenen ersten Ableitungen (Abschnitt 5.1.7) bestimmt werden<sup>(9)</sup>:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_6 \cos(x_3 - x_5) \\ \Rightarrow \ddot{x}_1 &= \dot{x}_6 \cos(x_3 - x_5) + x_6 (-\sin(x_3 - x_5) \cdot (\dot{x}_3 - \dot{x}_5)) \end{aligned} \quad (5.18)$$

und

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= x_6 \sin(x_3 - x_5) \\ \Rightarrow \ddot{x}_2 &= \dot{x}_6 \sin(x_3 - x_5) + x_6 (+\cos(x_3 - x_5) \cdot (\dot{x}_3 - \dot{x}_5)) \end{aligned} \quad (5.19)$$

Das Einsetzen der Gleichungen (5.18), (5.19) und (5.17) in die Ungleichung (5.16) erzeugt die gewünschte Nebenbedingung. Auf die Angabe der sich ergebenden Gleichung wird hier verzichtet.

### 5.1.9 Zielfunktional

Mit Hilfe des Zielfunktional wird ausgedrückt, dass die Länge des längsten Beschleunigungsvektors minimiert werden soll. Ferner sorgt es dafür, dass  $x_8$  die kleinste obere Schranke für die Längen der Beschleunigungsvektors ist.

$$F(x, u, t) := x_8 \quad (5.20)$$

Nach einer erfolgreich beendeten Berechnung ist  $x_8$  der Wert des Qualitätsfunktional  $F$  für die berechnete Stellvertretertrajektorie. Gleichzeitig ist  $x_8$  auch der Wert der Bewertungsfunktion  $G$  für die untersuchte Verkehrssituation.

### 5.1.10 Start- und Endzeit

Die Berechnung der Trajektorien ist zeitinvariant. Die Startzeit kann daher beliebig vorgegeben werden und wird hier mit  $t_0 = 0s$  festgelegt. Die Endzeit  $t_f$  wird

---

<sup>(9)</sup> $x_1$ : X-Position,  $x_2$ : Y-Position,  $x_3$ : Gierwinkel  $\psi$ ,  $x_5$ : Schwimmwinkel  $\beta$ ,  $x_6$ : Geschwindigkeit  $v$ ,  $x_8$ : Hilfsgröße

so gewählt, dass nach dem Passieren des Hindernisses genügend Zeit zur „Stabilisierung“ des Fahrzeugs verbleibt. Für die Berechnungen wurde die Endzeit mit  $t_f = 6s$  festgelegt. Wird die Endzeit kleiner gewählt und die Anzahl der Parametrisierungspunkte entsprechen verringert, so verkürzt sich die Rechenzeit. In einigen Fällen entstand jedoch der Eindruck, dass das Erfüllen der Randbedingungen für den Endzeitpunkt unerwünschte Auswirkungen auf die berechnete Stellvertretertrajektorie hatte und zu einer Art „Aufschwngen“ am Ende der Trajektorie führte. Möglicherweise kann eine geschwindigkeitsabhängige Wahl der Endzeit die Rechenzeiten verringern ohne dass die Qualität der Trajektorien in dieser Weise sinkt.

### 5.1.11 Randbedingungen

Die Randbedingungen legen den Ausgangszustand und den gewünschten Endzustand fest. Bei den Berechnungen in Kapitel 6 werden gemessene Werte vorgegeben.

$$x_1(t_0) = \text{Start-X-Position} \quad (5.21)$$

$$x_2(t_0) = \text{Start-Y-Position} \quad (5.22)$$

$$x_3(t_0) = \text{Start-Gierwinkel} \quad (5.23)$$

$$x_4(t_0) = \text{Start-Gierrate} \quad (5.24)$$

$$x_5(t_0) = \text{Start-Schwimmwinkel} \quad (5.25)$$

$$x_6(t_0) = \text{Start-Geschwindigkeit} \quad (5.26)$$

$$x_7(t_0) = \text{Start-Lenkwinkel} \quad (5.27)$$

Zur Endzeit soll das Fahrzeug einen stabilen Zustand haben. Es wird gefordert, dass sowohl der Gierwinkel und die Gierrate als auch der Schwimmwinkel kleine Beträge aufweisen. Eine Bedingung für die Position, die Geschwindigkeit und den Lenkwinkel wird nicht gefordert.

$$\begin{aligned} |x_i(t_f)| &\leq 10^{-7} \quad \text{für } i \in \{3, 4, 5\} \\ \Leftrightarrow \quad x_i(t_f) - 10^{-7} &\leq 0 \quad \text{und} \quad -x_i(t_f) - 10^{-7} \leq 0 \end{aligned} \quad (5.28)$$

Zunächst war gefordert worden, dass der Gierwinkel, die Gierrate und der Schwimmwinkel zum Endzeitpunkt gleich Null sind. Diese Forderung hat sich als unnötig stark erwiesen und die Stabilität stark herabgesetzt. Ferner wiesen die berechneten Stellvertretertrajektorie an ihren Enden häufig Störungen auf. Die obige Gleichung 5.28 stellt eine sinnvolle Abschwächung der ursprünglichen Forderung dar. Eine weitere Abschwächung hat zu keiner Verbesserung geführt.

### 5.1.12 Zusammenfassung

In den vorigen Abschnitten wurden die verschiedenen Bestandteile des Optimalsteuerproblems festgelegt, mit dem die Stellvertretertrajektorien berechnet

werden. Die vollständige Aufgabe ergibt sich als Zusammenfassung der vorab festgelegten Bestandteile. Die Nummern der entsprechenden Gleichungen sind jeweils in Klammern angegeben. Im Gegensatz zu den allgemeinen Optimierungsproblemen in Kapitel 4 wird hier ein spezielles Optimierungsproblem angegeben.

**Definition 11** (spezielles Optimierungsproblem)

*Gesucht sind Zustandsfunktionen  $x_1, \dots, x_8 : [t_0, t_f] \rightarrow \mathbb{R}$  und zwei Steuerfunktionen  $u_1, u_2 : [t_0, t_f] \rightarrow \mathbb{R}$ , die das Zielfunktional  $F$  (5.20) minimieren unter den Randbedingungen (5.21 bis 5.28), den Differentialgleichungsnebenbedingungen (5.8 bis 5.15), den Zustandsbeschränkungen (5.5, 5.7 und 5.16) und der Steuerbeschränkung (5.1).*

## 5.2 Anpassungen für die numerische Berechnung

Das obige spezielle Optimierungsproblem stellt eine unendlichdimensionale Aufgabe dar. Durch Parametrisierung der Steuerfunktion wird daraus ein endlichdimensionales Problem. Die numerischen Berechnungen waren anfänglich nur sehr selten erfolgreich. Erst durch die Normierung der Zustandsvariablen konnte die Anzahl der erfolgreichen Berechnungen gesteigert werden. Eine weitere Erhöhung der Verfügbarkeit wurde durch die Aufweichung der Randbedingungen erreicht. Zunächst war gefordert worden, dass Gierwinkel und -rate sowie der Schwimmwinkel für die Endzeit  $t_f$  gleich Null sind. Die leichte Abschwächung in Ungleichung (5.28) hat die Verfügbarkeit deutlich erhöht.

**Parametrisierung** Wie in Abschnitt 4.2.4.3 beschrieben, wird die Steuerfunktion  $u$  durch eine stückweise konstante Funktion  $u_p$  ersetzt. Aus dem unendlichdimensionalen Problem der optimalen Steuerung (Definition 11) wird ein endlichdimensionales Optimierungsproblem. Als Kompromiss zwischen Rechenaufwand und Genauigkeit wurde ein äquidistantes Zeitgitter mit 40 Stützstellen gewählt.

$$t_0 < t_1 < \dots < t_{39} < t_{40} = t_f \quad (5.29)$$

$$\text{mit } t_i = t_0 + i \cdot \frac{t_f - t_0}{40} \quad \text{für } i = 1, 2, \dots, 40 \quad (5.30)$$

Bei der Startzeit  $t_0 = 0s$  und der Endzeit  $t_f = 6s$  haben zwei aufeinanderfolgende Stützstellen einen Abstand von  $t_i - t_{i-1} = 0,15s$ .

Die Steuerfunktion  $u$  wird durch die stückweise konstante Funktion  $u_p : [t_0, t_f] \rightarrow \mathbb{R}^2$  ersetzt, die mit Hilfe des Vektors  $\tilde{u} \in \mathbb{R}^{80}$  definiert ist als

$$u_{p,1}(t) := \tilde{u}_i \text{ für } t \in [t_{i-1}, t_i) \quad \text{für } i = 1, 2, \dots, 40 \quad (h) \quad (5.31)$$

$$u_{p,2}(t) := \tilde{u}_{i+40} \text{ für } t \in [t_{i-1}, t_i) \quad \text{für } i = 1, 2, \dots, 40 \quad (h) \quad (5.32)$$

Damit ist  $u_{p,1}$  die parametrisierte Bremskraft und  $u_{p,2}$  die parametrisierte Lenkrate.

**Normierung** Die verwendeten Steuer- und Zustandsgrößen stammen aus verschiedenen Intervallen. Während die  $X$ -Position Werte im Intervall  $[-300m, +300m]$  annimmt, befinden sich die Werte des Schräglaufwinkels im Intervall  $[-0,18rad, 0,18rad]$ . Bei der Normierung werden alle Steuer- und Zustandsgrößen  $x_i$  so mit geeigneten Faktoren  $k_i$  multipliziert, dass die zu erwartenden Werte in einem vorgegebenen Bereich liegen. Für Werte mit wechselndem Vorzeichen ist dies das Intervall  $[-1, 1]$ . Für vorzeichenstabile Werte wird angestrebt, dass der Wert im Mittel Eins ist. Für die Trajektorienberechnung müssen alle Rand- und Nebenbedingungen, alle Zustandsbeschränkungen und die Zielfunktion entsprechend der Normierung angepasst werden.

Die gewählte Normierung hat wesentlichen Einfluss auf die numerische Stabilität. Ohne Normierung endet nur ein sehr geringer Anteil der Berechnungen erfolgreich. Die gewählten Normierungsfaktoren sind:

- $k_1 = 10^{-2}$  für die  $X$ -Position
- $k_2 = 10^{-1}$  für die  $Y$ -Position
- $k_3 = 10^0$  für den Gierwinkel
- $k_4 = 10^0$  für die Gierrate
- $k_5 = 10^1$  für den Schwimmwinkel
- $k_6 = 10^{-1}$  für die Geschwindigkeit
- $k_7 = 10^{-1}$  für den Lenkwinkel
- $k_8 = 10^0$  für die Hilfsgröße

### 5.3 Bewertung von Verkehrssituationen

Dieser Abschnitt fasst die Bestandteile der Verkehrssituationsbewertung mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien zusammen.

Zur Auslösung einer Notbremsung muss eine binäre Entscheidung getroffen werden. Dazu wird ein Schwellwert  $\alpha_{Schwell}$  festgelegt. Überschreitet die Bewertungsfunktion  $G$  diesen Schwellwert, so wird auf eine unvermeidbar eintretende Kollision geschlossen. Niedrigere Werte von  $\alpha_{Schwell}$  führen zu einer früheren Auslösung – höhere Werte reduzieren den Anteil an Fehlauflösungen.

Die Schwellwert  $\alpha_{Schwell}$  kann konstant sein oder er kann in Abhängigkeit von der Fahrbahnbeschaffenheit angepasst werden. Auf einer vereisten Straße könnte beispielsweise ein wesentlich geringerer Wert sinnvoll sein. Für diese Anpassung ist eine Bestimmung der Fahrbahnbeschaffenheit und dabei insbesondere die des Reibbeiwertes notwendig. Die Reibbeiwertschätzung ist Inhalt aktueller Forschungsaktivitäten(WS06) und wird hier nicht weiter betrachtet. Stattdessen

<sup>(h)</sup>Das letzte Intervall ist beidseitig abgeschlossen.

wird der Schwellwert  $a_{Schwell}$  als Konstante vorgegeben. In Kapitel 6 wird der Schwellwert mit  $a_{Schwell} = 7,6 \frac{m}{s^2}$  geschätzt.

Das gesamte Verfahren zur Erkennung unvermeidbarer Kollisionen hat in kompakter Form folgenden Ablauf:

1. Datenerfassung mit geeigneten Sensoren
2. Aufbereitung der Daten zu einem Umfeldmodell
3. Erzeugung eines Problems der optimalen Steuerung
4. Berechnung der Stellvertretertrajektorie als Lösung des Problems der optimalen Steuerung
5. Fallunterscheidung: Ist der Wert des Zielfunktional größer als der Schwellwert  $a_{Schwell}$ ?
  - JA : Kollision ist unvermeidbar: Auslösung der Notbremsung
  - NEIN : Kollision kann nicht vorhergesagt werden: weiter bei Punkt 1



## **6 Fahrversuch und Anwendung des Verfahrens**

Dieses Kapitel beschreibt den Fahrversuch, mit dem Testdaten für das vorgestellte Verfahren gewonnen werden. Mit Hilfe dieser Daten wird untersucht, ob das Verfahren funktioniert und wie oft es zu Fehlauflösungen kommt. Ferner wird die Verfügbarkeit bestimmt. Die Untersuchung der Funktionalität wird anhand der drei Thesen, die in Abschnitt 3.3 aufgestellt wurden, durchgeführt.

### **6.1 Versuchsdesign**

#### **6.1.1 Ziel des Versuchs**

Ziel des Versuchs ist es, Testverkehrssituationen für das vorgestellte Verfahren zu generieren. Um das vorgestellte Verfahren zu testen, werden Daten benötigt, die das Umfeld und den Zustand des eingesetzten Ego-Fahrzeugs beschreiben. Die Daten müssen die zu bewertende Verkehrssituation umfassend darstellen. Damit ermittelt werden kann, wie leistungsfähig das vorgestellte Verfahren ist und ob es zu Fehlauflösungen führt, soll eine große Anzahl von Messfahrten mit mehreren Testpersonen durchgeführt werden.

Die Einflüsse des individuell unterschiedlichen Schätzvermögens und der Reaktionszeit sollen minimiert werden. Um die Annahmen der Modellierung zu erfüllen, soll der Fahrversuch auf einer ebenen Straße mit homogenem Reibbeiwert stattfinden.

Zum Testen des Verfahrens werden

- die Konturdaten von Hindernissen und ihre Dynamik
- die fahrdynamischen Zustandsgrößen des Ego-Fahrzeugs
- die Reaktionen des Fahrers

während der Durchführung des Versuchs gemessen. Ferner wird dokumentiert, ob die Versuchsperson in der Lage war, die Situation ohne Kollision zu bewältigen. Unter den fahrdynamischen Zustandsgrößen nimmt der Betrag des Beschleunigungsvektors eine besonders wichtige Rolle ein, da das vorgestellte Verfahren die Beschleunigung berechnet, die notwendigerweise aufgebracht werden muss, um eine Kollision zu vermeiden. Die Fragen, die mit Hilfe des Versuchs geklärt werden sollen, sind:

1. Ist es unmöglich, mit Beschleunigungen, die geringer als die berechneten sind, eine Kollision zu vermeiden?
2. Ist die berechnete notwendige Beschleunigung ein signifikantes Merkmal, um Situationen, die zur Kollision führen, von solchen zu trennen, die nicht zur Kollision führen?

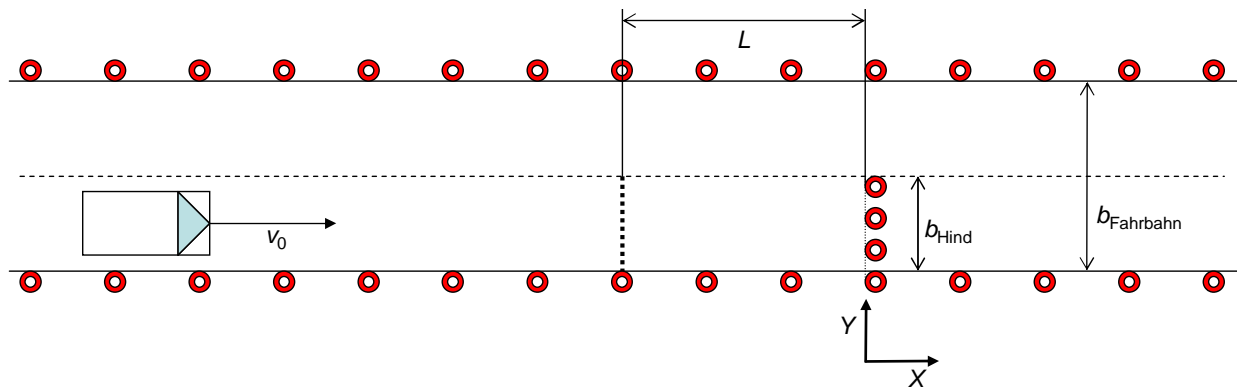


Abbildung 6.1: Versuchsanordnung

3. Ist eine automatische Notbremsung mit dem vorgestellten Auslösekriterium den aktuellen Verfahren überlegen?

Die Fragen können mit Hilfe eines Versuchs prinzipiell nicht positiv beantwortet werden. Deshalb werden hier die negierten Aussagen widerlegt. Damit wird gezeigt, dass die obigen Fragen zumindest für die gewählten Situationen zu bejahen sind. Die negierten Fragen wurden in Abschnitt 3.3 als Thesen aufgestellt.

### 6.1.2 Versuchsaufbau

Die beiden ersten Fragen werden anhand einfacher Verkehrssituationen beantwortet. Die Situationen lehnen sich an das Befahren einer geraden Landstraße an. Es wird davon ausgegangen, dass die Testpersonen mit einem solchen Szenario vertraut sind. Der entsprechende Geschwindigkeitsbereich von  $70 \frac{km}{h}$  bis  $100 \frac{km}{h}$  ist geeignet, um fahrdynamisch anspruchsvolle Ausweichmanöver zu provozieren. Die Fahraufgabe besteht darin, die Kollision mit einem stehenden Hindernis zu vermeiden, ohne die Fahrbahn zu verlassen. Es handelt sich also um eine Verkehrssituation mit mehr als einem relevanten Hindernis – nämlich den Fahrbahnrandern und dem eigentlichen Hindernis. Weil das Schätzvermögen der Testpersonen möglichst wenig Einfluss haben soll, wurde auf die Verwendung bewegter Hindernisse verzichtet. Die Versuchsanordnung ist schematisch in Abbildung 6.1 dargestellt: Auf einer Freifläche sind zwei  $420m$  lange Reihen von Pylonen aufgestellt. Die beiden Reihen haben einen Abstand von  $b_{Fahrbahn} = 7m$  voneinander. Das eine Ende dieser virtuellen Landstraße ist der Startpunkt für den Fahrversuch. In einer Entfernung von  $300m$  vom Startpunkt ragt von rechts eine Reihe von Pylonen in die Fahrbahn herein. Die Breite dieses Hindernisses ist  $b_{Hind} = 3,5m$ . Der Soll-Auslöseabstand  $L$  und die Soll-Auslösegeschwindigkeit  $v_0$  werden nach einem Versuchsplan variiert.

Diese einfache Verkehrssituation ist sehr häufig bei Auffahrunfällen anzutreffen, die typischerweise auf geraden Straßen mit einem stationären Hindernis geschehen (Gay07).

Als Versuchsfahrzeug kommt ein Fahrzeug zum Einsatz, welches eine vorgegebene Trajektorie automatisch abfahren kann. Das Fahrzeug verfügt über Messtechnik<sup>(a)</sup>, mit der die relevanten fahrdynamischen Größen bestimmt und aufgezeichnet werden. Ferner werden die Eingaben des Fahrers gespeichert.<sup>(b)</sup> Unter anderem werden folgende Größen dokumentiert:

- Fahrzeugposition
- Gierwinkel
- Gierrate
- Geschwindigkeit
- Schwimmwinkel
- Längs- und Querbesehleunigung
- Lenkwinkel
- Lenkmoment
- Bremsdruck

Die Aufzeichnung der Daten erfolgt mit einer Frequenz von 100Hz.

### **6.1.3 Versuchsablauf**

Jeder Proband erhält während der Eingewöhnung an das Fahrzeug eine kurze Einweisung. Die Eingewöhnung besteht darin, einen Parcours, der für Fahrsicherheitstrainings genutzt wird, zwei- oder dreimal zu absolvieren.

Zu Beginn einer jeden Messfahrt steht das Versuchsfahrzeug am Startpunkt. Die Testperson sitzt auf dem Fahrersitz und berührt weder Pedale noch das Lenkrad. Der Versuchsleiter startet die automatische Anfahrt auf das Hindernis. Die Längs- und Querregelung wird von einem Entwicklungssteuergerät vorgenommen. Der Wagen fährt selbständig in einem Abstand von 0,9m vom rechten Fahrbahnrand und beschleunigt auf Auslösegeschwindigkeit. Nach einem Versuchsplan gibt der Versuchsleiter einen Auslöseabstand zum Hindernis vor. An diesem räumlich festgelegten Punkt erfolgt die Übergabe an die Testperson. Die automatische Längs- und Querregelung endet. Der Übergabezeitpunkt wird der Testperson durch ein akustisches Signal angezeigt. Um die Reaktionszeit der Probanden zu minimieren, ertönen zwei Vorwarntöne in einem Abstand von zwei und einer Sekunde vor der Übergabe. Zum Übergabezeitpunkt sind die Längs- und Querbesehleunigung Null. Ab dem Übergabezeitpunkt führt die Testperson

---

<sup>(a)</sup>eine DGPS-gestützte Inertialplattform

<sup>(b)</sup>Aufgenommen werden sie mit den serienmäßig verbauten Sensoren.

$v_0$	$L$									
$70 \frac{km}{h}$	50m	38m	31m	27m	22m	19m	17m	15m	14m	13m
$85 \frac{km}{h}$		43m	34m	29m	26m	23m	21m	19m	18m	17m
$100 \frac{km}{h}$		51m	42m	34m	31m	28m	26m	24m	22m	21m

Tabelle 6.1: Auslöseabstände für verschiedene Auslösegeschwindigkeiten

das Fahrzeug. Sie soll versuchen, durch Lenk- und Bremseingriffe die Kollision mit dem Hindernis zu vermeiden. Das Fahrzeug soll dabei die Fahrbahn nicht verlassen. Die Bemühungen der Testperson gelten als erfolgreich, wenn keine Pylone versetzt oder umgeworfen wird.

Die ersten Fahrten dienen der Eingewöhnung an die Fahraufgabe. Insbesondere der zeitliche Abstand der Vorwarnsignale und die Übernahme eines fahrenden Fahrzeugs werden eingeübt.

Nach einer erfolgreichen Fahrt wird der Auslöseabstand herabgesetzt. Die Werte sind in Tabelle 6.1 aufgeführt. Nach einer erfolglosen Fahrt hat die Testperson zwei Wiederholungsversuche. Ist auch der dritte Versuch erfolglos, so gilt die Situation als nicht bestehbar für die Testperson. Im ersten Versuchsdurchgang ist die Auslösegeschwindigkeit auf  $70 \frac{km}{h}$  festgelegt. Es folgen zwei weitere Durchgänge mit  $85 \frac{km}{h}$  und  $100 \frac{km}{h}$ .

Die Transparenz des Versuchsaufbaus, die Wiederholung von Situationen und die akustische Vorwarnung sorgen dafür, dass die Testpersonen an ihre Leistungsgrenze geführt werden. Die Probanden können sich während der automatischen Anfahrt mehrere Sekunden mental auf ihre Aufgabe vorbereiten. Nach wenigen Fahrten sind sie mit den auftretenden Kräften und der Fahrzeugreaktion vertraut. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die im Versuch gezeigten Leistungen über denen liegen, die im realen Verkehr zu erwarten sind. Die Leistungsfähigkeit der Probanden wird also überschätzt.

## 6.2 Versuchsdurchführung

An der Versuchsreihe haben 19 Testpersonen<sup>(c)</sup> über einen Zeitraum von zwei Wochen teilgenommen. Als Probanden wurde Personen im Alter zwischen 18 und 25 Jahren gewählt. Ein Viertel der Testpersonen waren Frauen. Die altersbedingte geringe Erfahrung hat sich in Fahrversuch nicht negativ ausgewirkt. Die Leistungen waren vergleichbar mit denen erfahrener Probanden aus einem Vorversuch. Sowohl Probanden mit als auch ohne Erfahrung musste sich auf die spezielle Testsituation einstellen. Dabei musste insbesondere die Reaktion des Versuchsträgers auf heftige Lenkmanöver erfahren werden. Eine größere Fahrerfahrung

---

<sup>(c)</sup>20 Testpersonen sind ein guter Richtwert (Bor04).

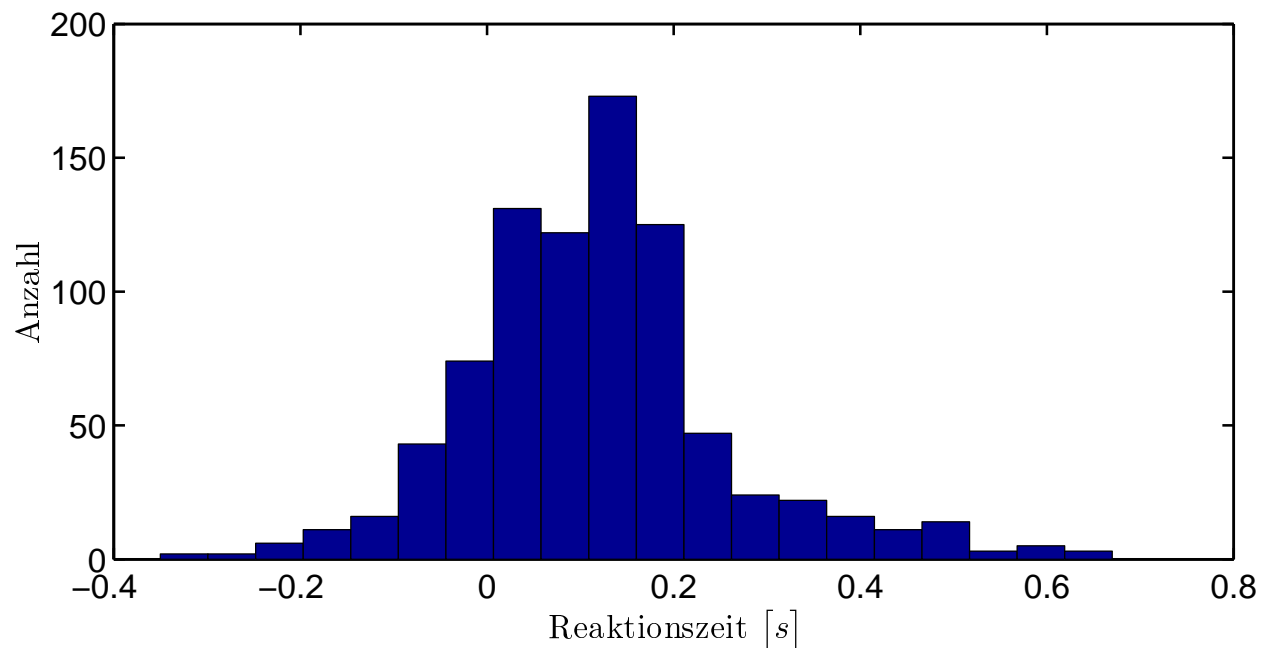


Abbildung 6.2: Histogramm der Reaktionszeiten

hat nicht zu wesentlich besseren Leistungen im Fahrversuch geführt.

Zwei Probanden haben in ihrer Freizeit intensiv Computerspiele – sogenannte First-Person-Shooter<sup>(d)</sup> – gespielt. Sie haben sich von den anderen Probanden dadurch abgehoben, dass sie auch schwierige Situationen fehlerfrei meistern konnten. Die Streuung ihrer vergleichsweise kurzen Reaktionszeiten war geringer als bei den anderen Probanden. Durch ähnliche Leistungen hat sich ein Fußballspieler der Regionalliga von den übrigen Probanden abgehoben.

Die Leistung im Fahrversuch scheint mehr abzuhängen von der Fähigkeit unter Stress eine gute Reaktion abrufen zu können als von der Fahrerfahrung. Weil die Probanden nicht in Bezug auf diese Fähigkeit ausgewählt wurden, kann keine Relation zur Leistung eines durchschnittlichen oder überdurchschnittlichen Fahrers hergestellt werden.

Von den 19 Probanden wurden insgesamt 840 verwertbare Messfahrten aufgezeichnet. Dabei erfolgte die Reaktion auf das akustische Auslösesignal mit unterschiedlicher Verzögerung. Der Zeitpunkt des ersten Eingriffs wurde aus dem Verlauf des Lenkmoments bestimmt.<sup>(e)</sup> Teilweise wurde bereits deutlich vor dem Signalton in die Lenkung eingegriffen. Diese Messungen wurden dann wiederholt. Die Reaktionszeit lag für einen wesentlichen Anteil der Testpersonen zwischen 0s und 0,2s (vgl. Abbildung 6.2). Bei den gewählten Auslösegeschwindigkeiten von  $70 \frac{km}{h}$  bis  $100 \frac{km}{h}$  wurden innerhalb der typischen Reaktionszeit bis zu 5,5m zu-

<sup>(d)</sup>Dabei läuft der Protagonist durch eine virtuelle Umgebung und versucht Mitspieler zu töten. Schnelle Reaktionen und hohe Präzision werden für den Spielerfolg benötigt.

<sup>(e)</sup>in Fällen, in denen nur gebremst wurde, aus dem Bremsdruck

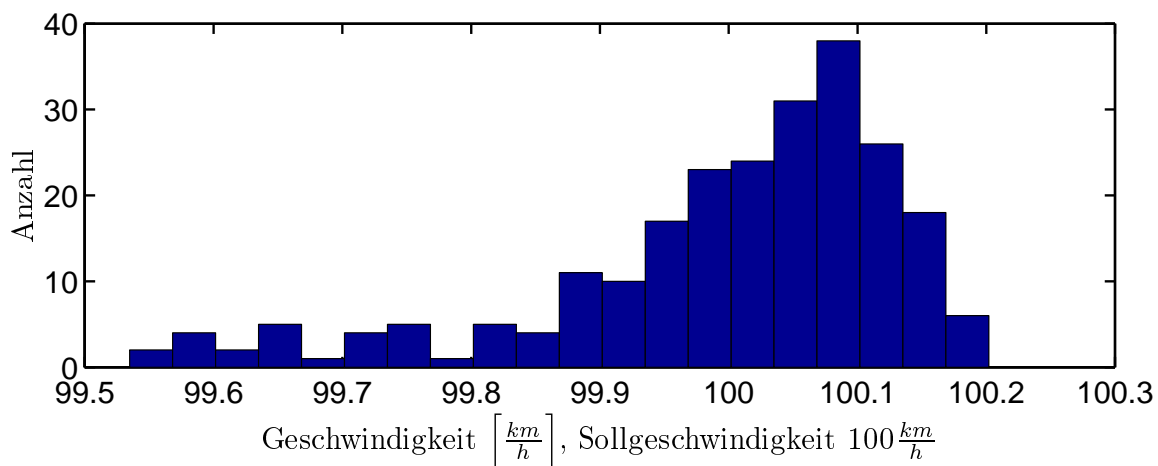
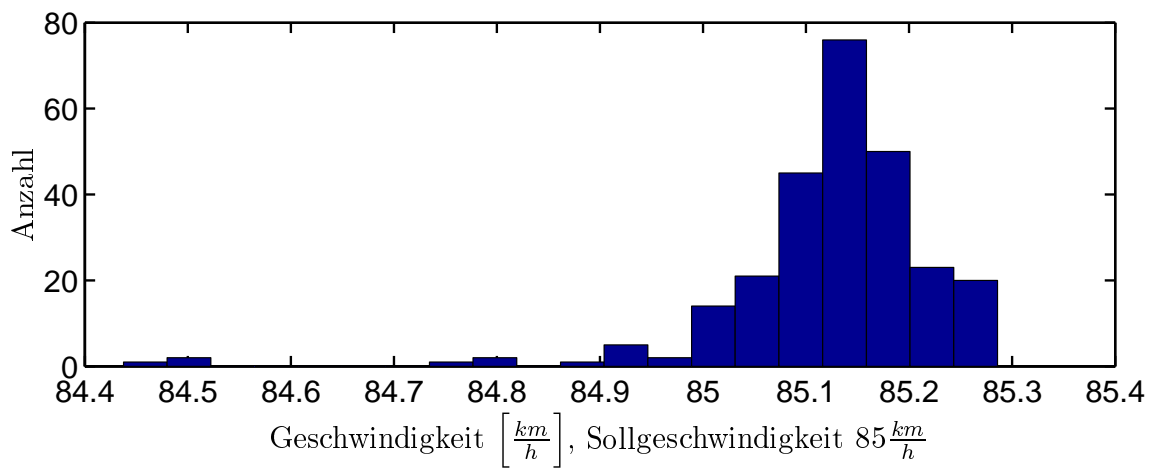
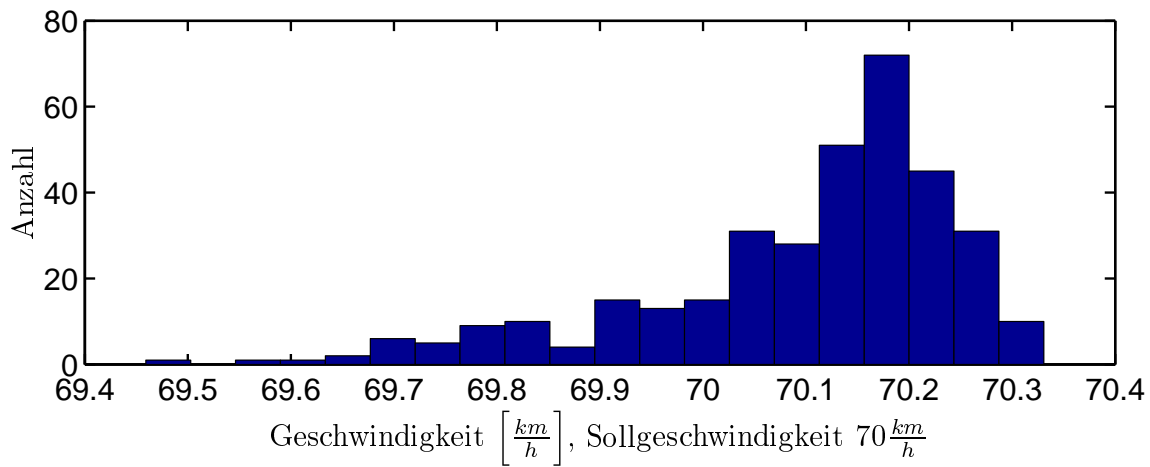


Abbildung 6.3: Histogramme der Geschwindigkeit zum Auslösezeitpunkt

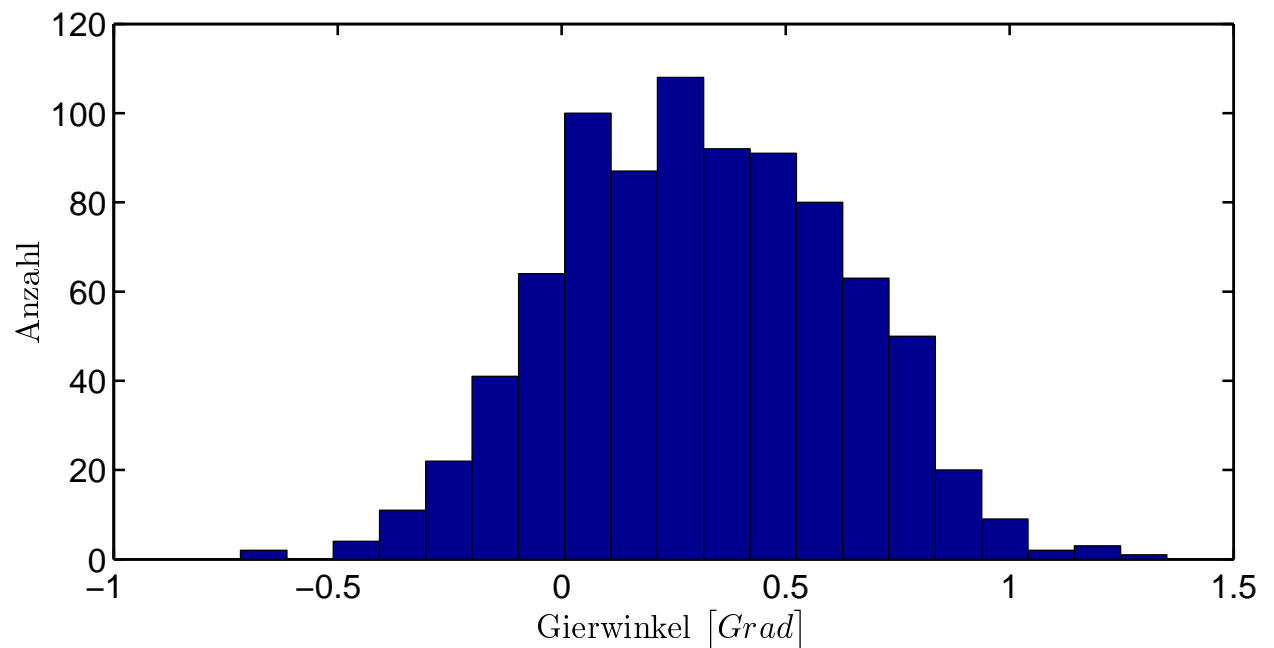


Abbildung 6.4: Histogramm des Gierwinkels zum Auslösezeitpunkt

rückgelegt. Die Auslöseentfernung zum Hindernis wurde hingegen in Schritten von nur einem Meter variiert. Die Streuung der Reaktionszeit verschob den Auslöseort somit stärker als die vorgegebene Variation durch den Versuchsleiter. Die geplante Zusammenfassung von Messfahrten mit identischen Vorgabewerten ist daher nicht sinnvoll. Bei den Versuchen wurde darauf geachtet, dass die Reaktionszeiten für jeden Probanden nicht zu stark streuen.

Die Geschwindigkeit zum Übergabezeitpunkt stimmte stets sehr gut mit der Vorgabe überein. Abbildung 6.3 gibt einen Überblick über die Geschwindigkeit zum Auslösezeitpunkt. Die maximale Abweichung beträgt weniger als  $0,6 \frac{km}{h}$ . Die Gierrate war zum Zeitpunkt der Übergabe an den Fahrer so klein, dass sie mit der verwendeten Inertialplattform nicht bestimmt werden konnte. Der Gierwinkel sollte Null sein, er wies aber geringe Fehler auf. Abbildung 6.4 zeigt, dass der Gierwinkel nicht mehr als  $1,5^\circ$  vom Sollwert abwich. Dass der Durchschnitt der Gierwinkel bei der Übergabe nicht Null war, lag wahrscheinlich daran, dass die Fahrbahn eine Neigung aufwies. Aus demselben Grund wurde im Mittel eine geringe Quergeschwindigkeit bei der Übergabe gemessen (vgl. Abbildung 6.5). Die Querposition wies eine Schwingung auf. Die Amplitude war ungefähr  $15cm$  bei einer Frequenz von  $0,6Hz$ . Durch diese Schwingung wurde die Ablage zum Übergabezeitpunkt nicht präzise eingeregelt. Im Einzelfall wurden Abweichungen von bis zu  $30cm$  vom Sollwert  $1,75m$  erreicht. Die typische Abweichung betrug  $15cm$  (vgl. Abbildung 6.6).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Geschwindigkeit, der Gierwinkel und die Gierrate bei der Übergabe der Fahrzeugführung an die

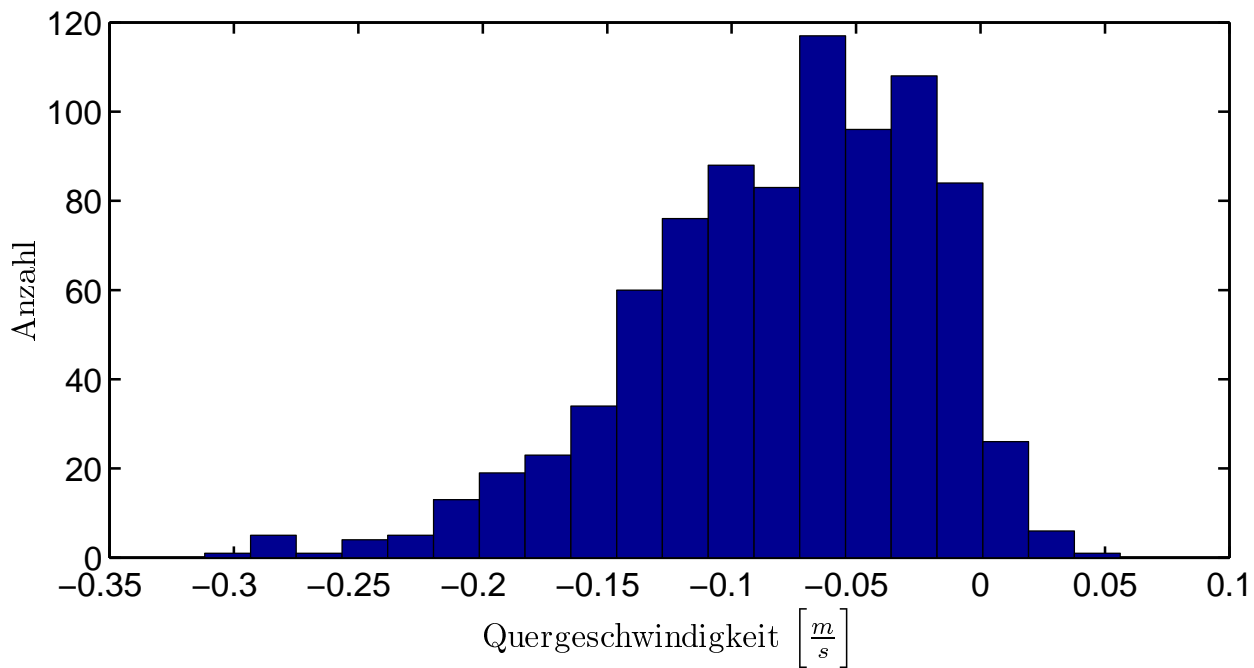


Abbildung 6.5: Histogramm der Quergeschwindigkeit zum Auslösezeitpunkt

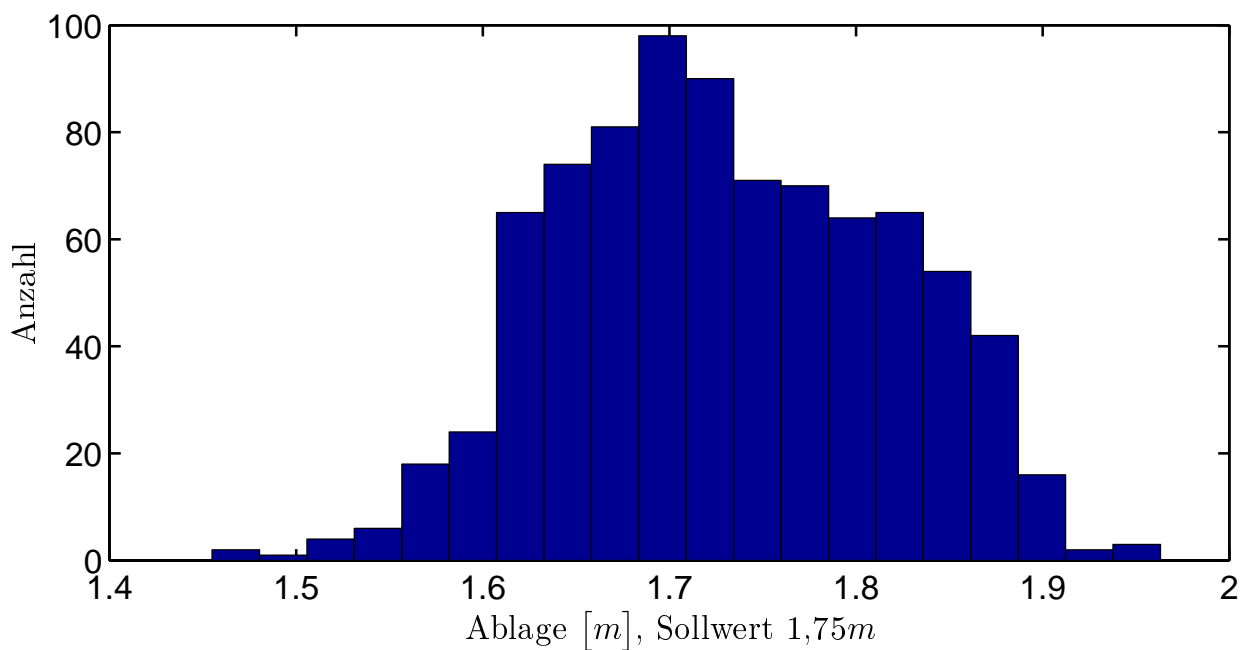


Abbildung 6.6: Histogramm der Ablage zum Auslösezeitpunkt



Versuchsperson den Vorgaben entsprachen. Die Ablage und der Abstand zum Hindernis wiesen zum Zeitpunkt der Übergabe Fehler auf. Insbesondere der Auslöseabstand entsprach nicht den Vorgaben. Die Schwierigkeit der Fahraufgabe schwankte durch diese Fehler stark. Bei der Auswertung lassen sich Versuchsfahrten mit identischen Vorgabewerten daher nicht zu Gruppen zusammenfassen.

## **6.3 Auswertung**

Für jede der 840 erfolgreich aufgenommen Messfahrten wird die Situationsbewertung mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien durchgeführt. Leider können 22% der Situationen (185 Fälle) nicht erfolgreich bewertet werden. Der Abschnitt beginnt daher mit den Betrachtungen der Verfügbarkeit. Es folgen die Widerlegung der drei Thesen und die Betrachtung von Fehlauflösungen.

### **6.3.1 Verfügbarkeit**

Bei den Anpassungen für die numerische Berechnung ist deutlich geworden, dass die Trajektorienberechnung sehr sensibel auf Veränderungen der Normierungsfaktoren und der Anzahl von Diskretisierungspunkten reagiert. Auch bei sorgfältiger Auswahl der Parameter hat die Trajektorienberechnung nur für 78% der Messfahrten wunschgemäß terminiert. In den übrigen Fällen hat der Algorithmus abgebrochen, weil entweder die maximale Anzahl von Iterationsschritten überschritten wurde oder weil keine zulässige Trajektorie gefunden werden konnte. Es ließ sich kein Zusammenhang zwischen der zu bewertenden Verkehrssituation und dem Erfolg der Berechnung feststellen.

Im Folgenden wird angenommen, dass tatsächlich kein solcher Zusammenhang besteht. Kann eine unvermeidbare Kollision nicht erkannt werden, weil der Algorithmus nicht terminiert, so könnte die Situation aber mit gleicher Wahrscheinlichkeit von 78% bei der nächsten Berechnung korrekt bewertet werden. Das korrekte Ergebnis würde dann mit einer Verspätung eintreffen, die dem zeitlichen Abstand von zwei aufeinanderfolgenden Berechnungen entspricht. Die Wahrscheinlichkeit, dass zwei aufeinanderfolgende Berechnungen nicht korrekt terminieren, ist 4,8% – die, dass drei aufeinanderfolgende scheitern, ist 1,1%. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Verfügbarkeit noch verbesserungswürdig ist.

### **6.3.2 Widerlegung der ersten These**

#### *These 1*

*Die mit der Bewertungsfunktion  $G$  berechneten Längen der Beschleunigungsvektoren haben keinen Bezug zu den tatsächlich aufzubringenden Beschleunigungen. Es ist möglich eine Kollision mit einer Beschleunigung, die niedriger als die berechnete ist, zu vermeiden.*

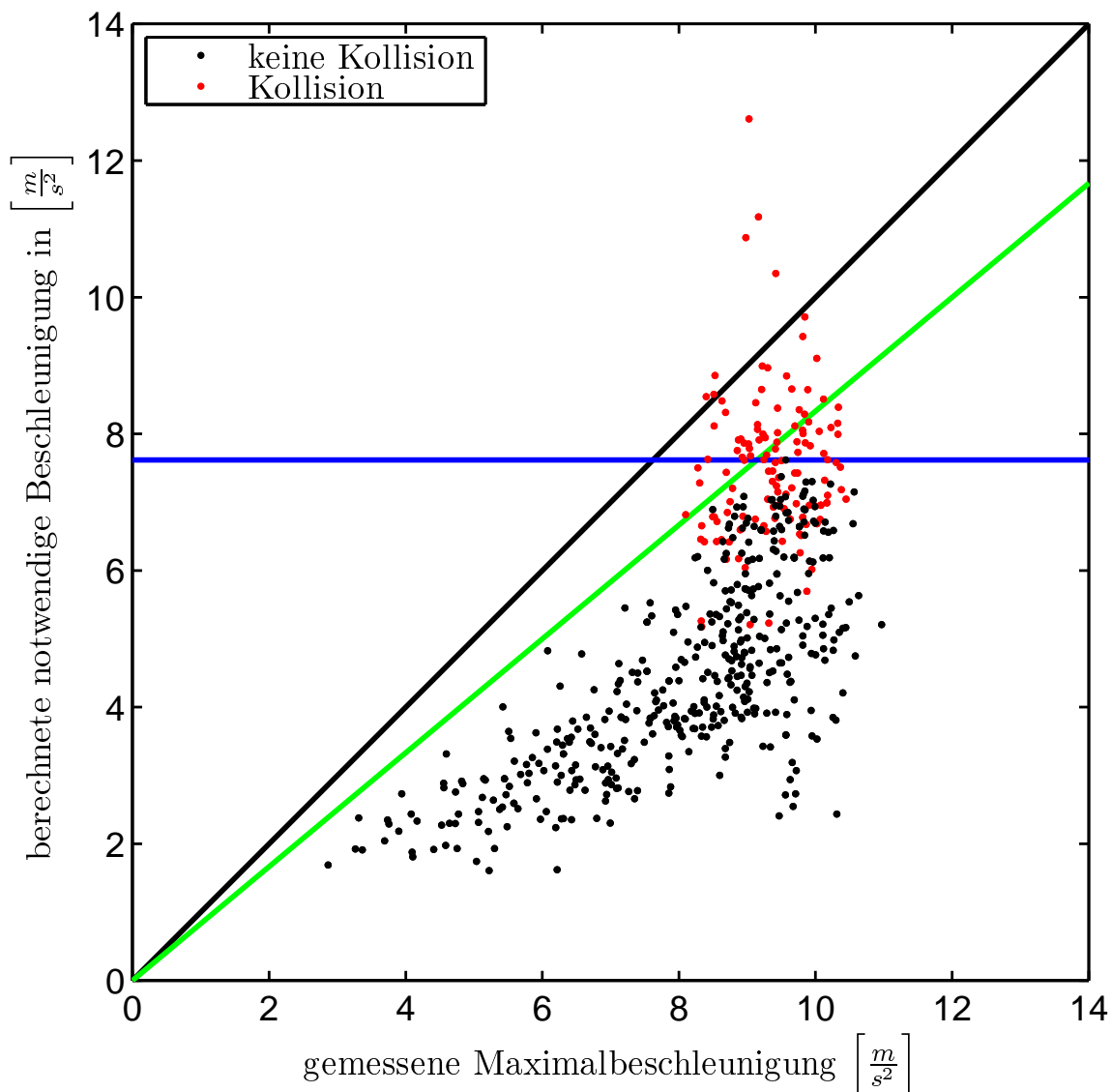


Abbildung 6.7: Übersicht: Erfolg je nach gemessener Maximalbeschleunigung und berechneter notwendiger Beschleunigung

Während aller Versuchsfahrten wurden die Beschleunigungen gemessen, die die Probanden in Längs- und Querrichtung aufgebracht haben. Für jede Messfahrt wird aus diesen Daten der Betrag des längsten Beschleunigungsvektors ermittelt. Dieser Betrag wird im Folgenden die „gemessene Maximalbeschleunigung“ genannt. In Abbildung 6.7 ist die mit der Bewertungsfunktion  $G$  berechnete notwendige Beschleunigung über der gemessenen Maximalbeschleunigung aufgetragen. Jedem schwarzen Punkt entspricht eine kollisionsfreie Messfahrt. Zu jedem roten Punkt gehört eine Messfahrt, die mit einer Kollision endete. Oberhalb der schwarz eingezeichneten Winkelhalbierenden befinden sich Punkte, für die

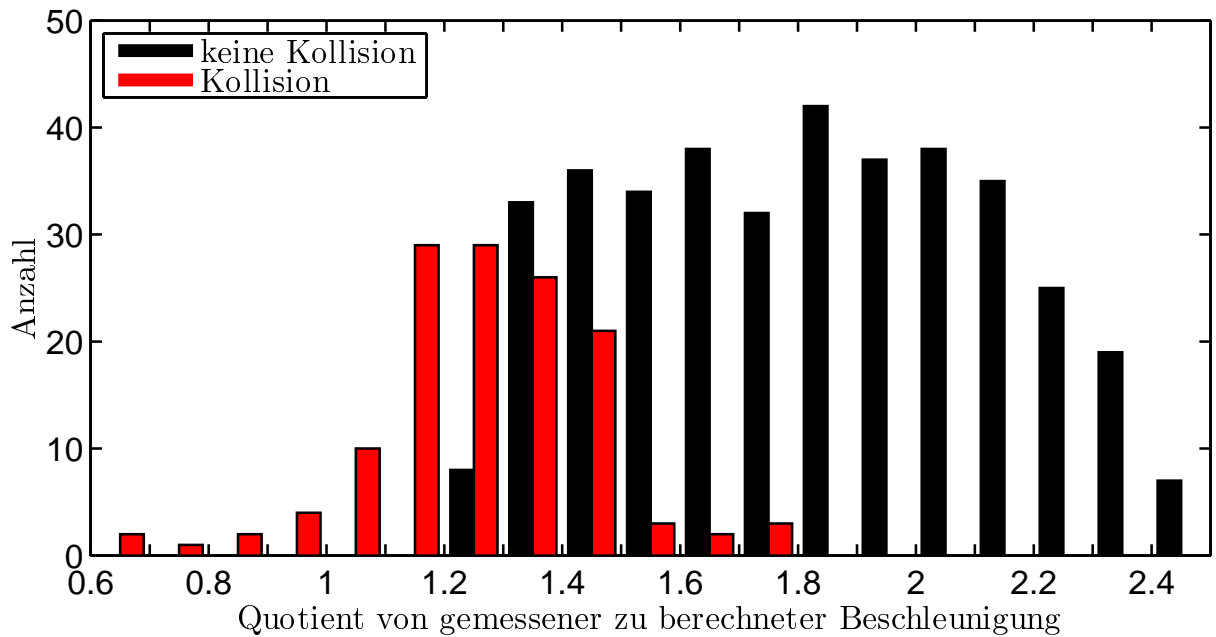


Abbildung 6.8: Histogramm des Quotienten von gemessener zu berechneter Beschleunigung

die gemessene Maximalbeschleunigung kleiner als die berechnete notwendige Beschleunigung ist. Alle diese Messfahrten endeten mit einer Kollision. Auch alle Messfahrten, die zu Punkten oberhalb der grünen Geraden gehören, endeten mit einer Kollision. Die gemessene Maximalbeschleunigung war in diesen Fällen kleiner als das 1,2-fache der berechneten notwendigen Beschleunigung.

Im Fahrversuch hat kein Proband eine Kollision verhindern können, wenn er weniger Beschleunigung aufgebracht hat als die berechnete notwendige Beschleunigung. Die zweite Aussage der *These 1* ist damit widerlegt.

Für die Widerlegung der ersten Aussage von *These 1* wird das Verhältnis von gemessener Maximalbeschleunigung zu berechneter notwendiger Beschleunigung analysiert. Abbildung 6.8 zeigt das Histogramm dieses Quotienten. Die kollisionsfreien Messfahrten sind zu schwarzen Balken zusammengefasst, die Messfahrten, die mit einer Kollision endeten, zu roten Balken. Es ist zu erkennen, dass alle Messfahrten mit einem Quotienten kleiner als 1,2 mit einer Kollision endeten. Weiter ist zu erkennen, dass alle Messfahrten mit einem Quotienten größer als 1,8 ohne Kollision endeten. Es ist ersichtlich, dass die schwarz und die rot gekennzeichneten Verteilungen nicht identisch sind. Ein Wilcoxon-Test<sup>(f)</sup> zum Vertrauensniveau 1% bestätigt dies: Der betrachtete Quotient weist unterschiedliche Verteilungen auf, je nach dem, ob im weiteren Verlauf der Messfahrt eine Kollision eintrat oder nicht. Die erste Aussage der *These 1* ist damit widerlegt.

<sup>(f)</sup>Der Wilcoxon-Test ist geeignet, um zwei Messreihen darauf zu untersuchen, ob sie derselben Verteilung entsprechen.

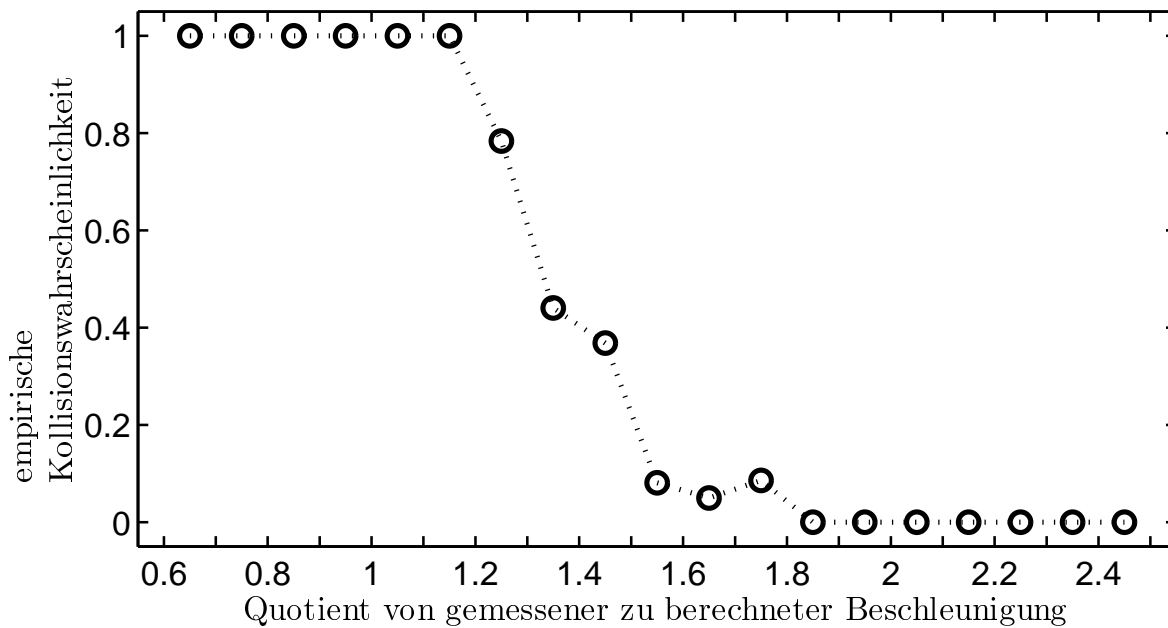


Abbildung 6.9: Verhältnis von kollisionsbehafteten zu kollisionsfreien Messfahrten über dem Quotienten von gemessener zu berechneter Beschleunigung

Für Quotienten zwischen 1,2 und 1,8 führt ein Teil der Messfahrten zur Kollision. Dieser Anteil wird als empirische Kollisionswahrscheinlichkeit bezeichnet und als

$$\frac{\text{Anzahl der Messfahrten mit Kollision}}{\text{Anzahl der Messfahrten mit Kollision} + \text{Anzahl der Messfahrten ohne Kollision}}$$

definiert. In Abbildung 6.9 ist ein monotoner, nichtlinearer Zusammenhang zwischen dem Quotienten und der empirischen Kollisionswahrscheinlichkeit zu erkennen. Die genauere Bestimmung dieses Zusammenhangs bedarf weiterer Untersuchungen.

### 6.3.3 Widerlegung der zweiten These

#### These 2

*Mit Hilfe der Bewertungsfunktion  $G$  ist keine Unterteilung der Verkehrssituationen in solche, die zur Kollision führen, und solche, die nicht notwendigerweise zur Kollision führen, möglich.*

In Abbildung 6.7 ist zu erkennen, dass alle Messfahrten, für die die mit der Bewertungsfunktion  $G$  berechnete notwendige Beschleunigung einen gewissen Wert übersteigt, zur Kollision geführt haben. Exemplarisch ist der Wert  $a_{\text{Schwell}} = 7,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

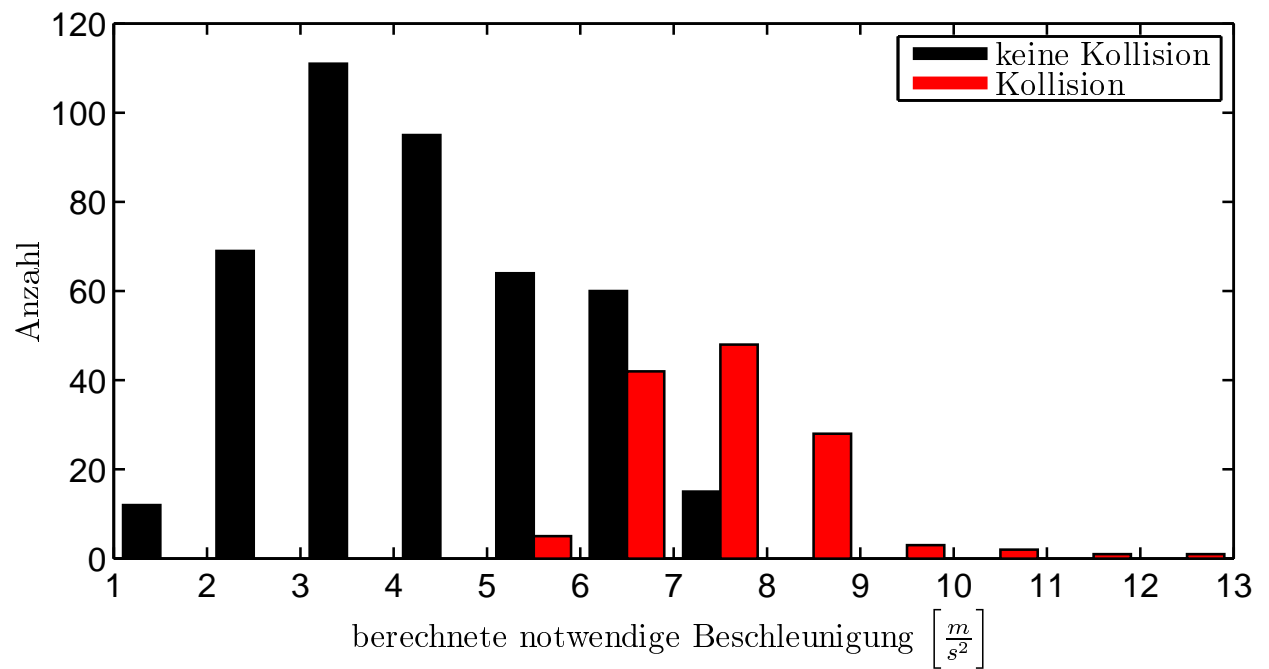


Abbildung 6.10: Histogramm der berechneten Beschleunigung

als blaue Gerade eingezeichnet. Alle Messfahrten, für die die berechnete notwendige Beschleunigung größer ist, führten zur Kollision. Abbildung 6.10 zeigt das Histogramm der berechneten notwendigen Beschleunigung. Alle kollisionsfreien Messfahrten sind zu schwarzen Balken zusammengefasst, alle, die mit einer Kollision endeten, zu roten. Es ist ersichtlich, dass die rot und die schwarz dargestellten Verteilungen nicht identisch sind. Zu sehen ist ferner, dass alle Messfahrten, für die die berechnete notwendige Beschleunigung größer als  $8 \frac{m}{s^2}$  ist, zur Kollision geführt haben. Ist die berechnete notwendige Beschleunigung hingegen kleiner als  $5 \frac{m}{s^2}$ , so endete die Messfahrt ohne Kollision. Weiter ist ersichtlich, dass die rot gekennzeichnete Verteilung von der schwarz gekennzeichneten abweicht. Ein Wilcoxon-Test zum Vertrauensniveau 1% bestätigt dies. Die berechnete notwendige Beschleunigung weist eine unterschiedliche Verteilung auf, je nachdem ob im weiteren Verlauf eine Kollision eintrat oder nicht. Die Aussage der *These 2* ist damit widerlegt.

In Abbildung 6.11 ist ein nahezu monotoner, nichtlinearer Zusammenhang zwischen der berechneten notwendigen Beschleunigung und der empirischen Kollisionswahrscheinlichkeit zu erkennen. Die genauere Bestimmung dieses Zusammenhangs bedarf weiterer Untersuchungen. Falls sich dieser Zusammenhang aufklären ließe, könnte die tatsächliche Kollisionswahrscheinlichkeit bestimmt werden.

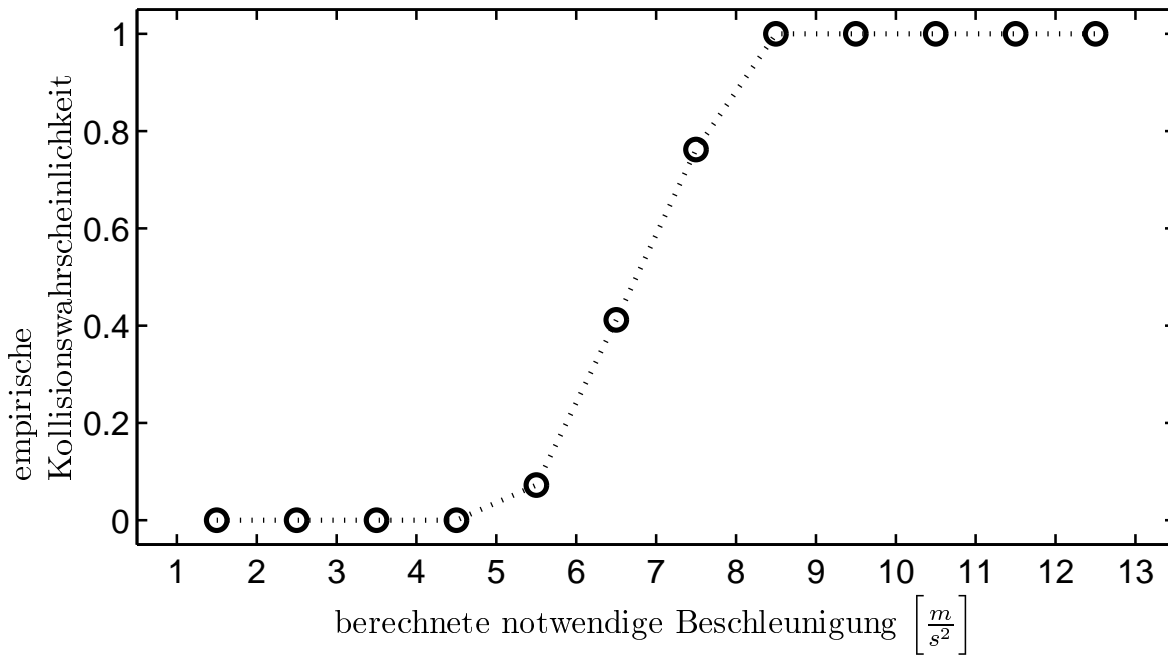


Abbildung 6.11: Verhältnis von kollisionsbehafteten zu kollisionsfreien Messfahrten über der berechneten Beschleunigung

### 6.3.4 Widerlegung der dritten These

#### These 3

*Die Erkennung unvermeidbarer Kollisionen mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien führt nicht zu einer früheren Auslösung der automatischen Notbremsung im Vergleich zu Auslösekriterien nach dem Stand der Technik. Eine Reduktion der Verletzungsschwere ist nicht zu erwarten.*

Zur Widerlegung der *These 3* werden die Ergebnisse mit dem Verfahren von Busch und dem Verfahren der Verfolgung von Aufenthaltsgebieten verglichen. Auf einen Vergleich mit dem Verfahren von Kopischke wird verzichtet, da es stets später als das von Busch auslöst. Auf die Reduktion der zu erwartenden Verletzungsschwere wird abschließend eingegangen.

#### Vergleich mit dem Verfahren von Busch

Der Vergleich mit dem Verfahren von Busch beschränkt sich auf theoretische Überlegungen. Der Vergleich erfolgt in zwei Teilen. Im ersten werden die Verfahren in Verkehrssituationen mit einem einzigen relevanten Hindernis verglichen. Im zweiten Teil werden Verkehrssituationen mit mehr als einem relevanten Hindernis betrachtet.

Bei Verkehrssituationen, in denen das Ego-Fahrzeug nur mit einem einzigen Hindernis kollidieren kann, ist die Qualität der untersuchten Trajektorien entscheidend für die Qualität des gesamten Verfahrens. Falls die Trajektorien die

Leistungen des Fahrzeugs unterschätzen, so werden existierende Ausweichtrajektorien nicht berücksichtigt. Dies führt dazu, dass eine Kollision als sicher eintretend vorhergesagt wird, obwohl sie eventuell noch vermeidbar ist. Eine automatische Notbremsung würde zu früh ausgelöst. Solche Fehlauslösungen können nur vermieden werden, wenn die untersuchten Trajektorien die Leistungen des Fahrzeugs überschätzen. Sowohl beim Verfahren von Busch als auch bei dem in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren werden Fehlauslösungen auf diese Weise vermieden. Je stärker die Trajektorien die Leistungen des Fahrzeugs überschätzen, desto später werden unvermeidbare Kollisionen als solche erkannt. Da Busch für die Trajektorienberechnung eine aufwendige Simulation nutzt, ist davon auszugehen, dass die untersuchten Trajektorien von höherer Qualität sind als die in dieser Arbeit verwendeten, die mit Hilfe des Einspurmodells gewonnen werden. In Situationen mit einem relevanten Hindernis löst das Verfahren von Busch daher früher als das hier vorgestellte Verfahren aus.

In Verkehrssituationen, in denen das Ego-Fahrzeug mit mehreren Hindernissen kollidieren kann, werden mit dem Verfahren von Busch die Hindernisse einzeln und nacheinander betrachtet. Beispielsweise würde die Situation, wie sie im Fahrversuch gegeben war (vgl. Abbildung 6.1 auf Seite 70), untersucht werden, indem drei Teilsituationen analysiert würden. Die erste enthielte als potentiellen Konfliktpartner nur den rechten Fahrbahnrand, die zweite nur den linken Fahrbahnrand und die dritte würde nur das eigentliche Hindernis enthalten. Die beiden ersten Teilsituationen würden als unkritisch erkannt. Bei der dritten würde, bei entsprechend geringem Abstand zum Hindernis, eine unvermeidbare Kollision erkannt. Der Abstand wäre bereits so klein, dass alle sechs berechneten Trajektorien zur Kollision mit dem Hindernis führten. Dass die linke und die rechte Fahrbahnbegrenzung die Situation verschärfen, und dass in der Gesamtsituation bereits vorher die Kollision unvermeidbar geworden ist, wird nicht erkannt. An dieser Stelle ist das hier vorgestellte Verfahren der Berechnung von Stellvertretertrajektorien dem Verfahren von Busch überlegen. Bei der Berechnung von Stellvertretertrajektorien werden alle Hindernisse simultan berücksichtigt.

### **Vergleich mit dem Verfahren der Verfolgung von Aufenthaltsgebieten**

Dem Verfahren der Verfolgung von Aufenthaltsgebieten liegt eine sehr einfache Annahme über die Fahrzeugdynamik zu Grunde (vgl. Abschnitt 2.5.3). Lediglich das Beschleunigungsvermögen – also die maximale Länge der auftretenden Beschleunigungsvektoren – ist durch eine vorzugebende Konstante  $a_{VA}$  begrenzt. Für die Situationsbewertung mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien muss ebenfalls eine maximale Beschleunigung  $a_{Schwell}$  vorgegeben werden, die als Schwellwert zur Auslösung der automatischen Notbremsung benötigt wird. Da beide Verfahren auch eine Vollbremsung als kollisionsvermeidendes Manöver berücksichtigen sollen, ist es naheliegend, die Werte von  $a_{VA}$  und  $a_{Schwell}$  gleich zu wählen. Für die weitere Betrachtung wird  $a_{VA} = a_{Schwell}$  angenommen.<sup>(9)</sup>

<sup>(9)</sup> Ohne diese oder eine ähnliche Annahme sind die Verfahren nicht vergleichbar.

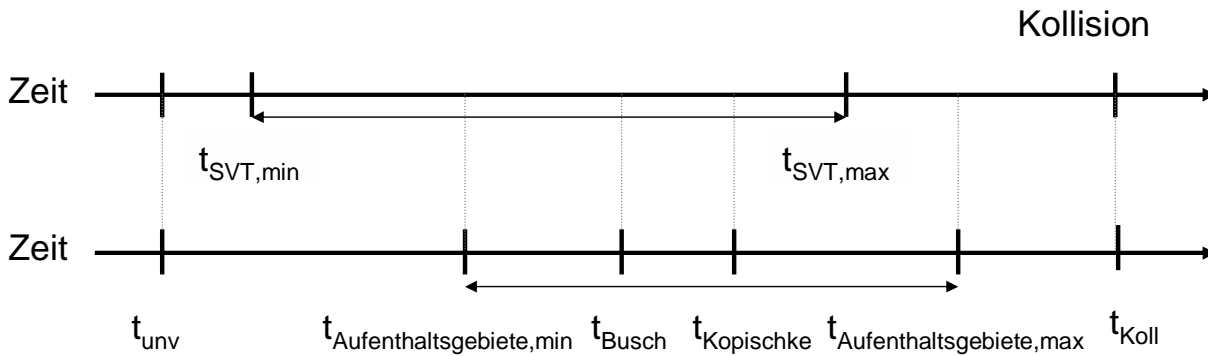


Abbildung 6.12: Zeitliche Abfolge der Kollisionserkennung

Im Folgenden wird gezeigt, dass das Verfahren der Verfolgung von Aufenthaltsgebieten niemals vor der Situationsbewertung mit Stellvertretertrajektorien eine unvermeidbare Kollision als solche erkennt. Der Nachweis wird geführt, indem die folgende gleichbedeutende Aussage bewiesen wird: Wenn die Situationsbewertung mit Stellvertretertrajektorien keine unvermeidbare Kollision erkennt, so erkennt auch das Verfahren der Verfolgung von Aufenthaltsgebieten keine unvermeidbare Kollision.

Sei nun eine Verkehrssituation gegeben, in der die Situationsbewertung mit Stellvertretertrajektorien keine Kollision vorhersagt. Das heißt, dass es eine Stellvertretertrajektorie gibt, deren längster Beschleunigungsvektor kürzer als  $a_{Schwell}$  ist. Nach obiger Annahme sind daher auch alle Beschleunigungsvektoren kürzer als  $a_{VA}$ . Die Stellvertretertrajektorie liegt daher in allen betrachteten Aufenthaltsgebieten und es folgt, dass kein Aufenthaltsgebiet die leere Menge ist. Das Verfahren der Verfolgung von Aufenthaltsgebieten erkennt daher keine unvermeidbare Kollision. Damit ist das Gewünschte bewiesen.

Weil die Trajektorien, die zur Berechnung der Stellvertretertrajektorie berücksichtigt werden, dem Einspurmodell entsprechen und damit stärker eingeschränkt sind als die Trajektorien, die für die Aufenthaltsgebiete berücksichtigt werden, kann davon ausgegangen werden, dass mit Hilfe der Stellvertretertrajektorien früher als mit dem Verfahren der Aufenthaltsgebiete ausgelöst werden kann.

Abbildung 6.12 zeigt die zeitliche Abfolge, in der die verschiedenen Verfahren die automatische Notbremsung auslösen. Der früheste und der späteste Zeitpunkt, an dem mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien eine Kollision als unvermeidbar vorausgesagt wird, ist mit  $t_{SVT,min}$  beziehungsweise  $t_{SVT,max}$  bezeichnet.

### kombiniertes Auslösekriterium

Beim kombinierten Auslösekriterium wird eine Notbremsung ausgelöst, sobald das Verfahren von Busch oder die Situationsbewertung mit Hilfe von Stellver-



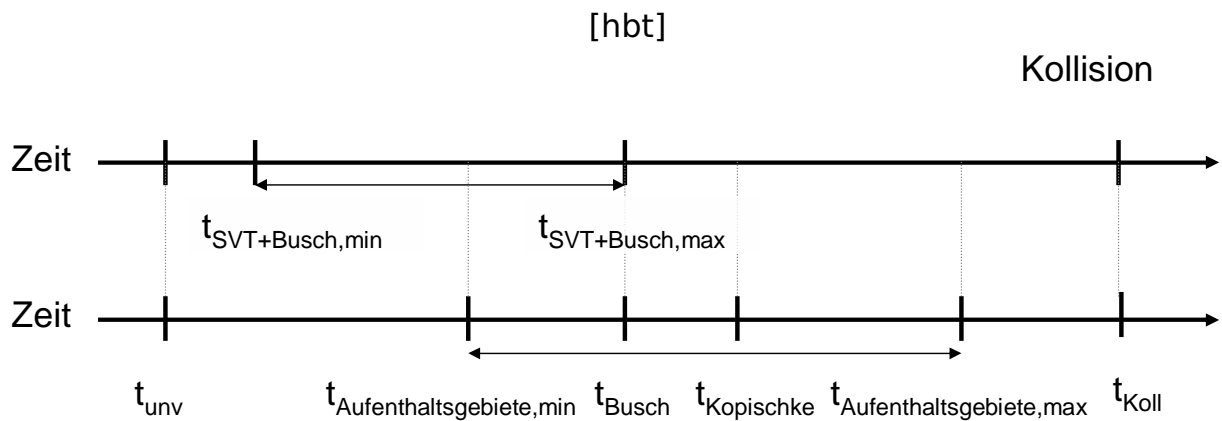


Abbildung 6.13: Zeitliche Abfolge der Kollisionserkennung

tretertrajektorien eine Kollision als unvermeidbar erkennt. Diese Kombination stellt sicher, dass nicht später als beim Verfahren von Busch ausgelöst wird. Gleichzeitig ist wird in Situationen mit mehreren relevanten Hindernisse früher als bei der Verfolgung von Aufenthaltsgebieten ausgelöst. Somit löst das kombinierte Auslösekriterium in keiner Verkehrssituation später als die bekannten Verfahren aus. Weil es aber in einem Teil der Verkehrssituationen früher als die anderen Verfahren auslöst, ist es den anderen Verfahren überlegen. Abbildung 6.13 zeigt die zeitliche Abfolge der Verfahren. Der früheste und der späteste Zeitpunkt, an dem das kombinierte Auslösekriterium eine Kollision als unvermeidbar voraussagt, ist mit  $t_{SVT+Busch,min}$  beziehungsweise  $t_{SVT+Busch,max}$  bezeichnet.

### Zu erwartende Reduktion der Verletzungsschwere

Busch prognostiziert den Sicherheitsgewinn einer automatischen Notbremsfunktion anhand realer Unfalldaten (Bus04). Dafür werden 4579 Datensätze aus der GIDAS<sup>(h)</sup>-Datenbank verwendet. In den Datensätzen sind Informationen über die an der Kollision beteiligten Fahrzeuge und Insassen enthalten. Für weitere Fahrzeuge, Fußgänger und stationäre Hindernisse sowie den Straßenverlauf sind keine Daten vorhanden. Die von Busch untersuchte, fiktive Notbremsfunktion ist daher auf den Konflikt mit einem einzigen Unfallpartner ausgerichtet. Verglichen wird die tatsächliche Schwere der Verletzungen mit fiktiven Werten, die beim Einsatz der simulierten Notbremsung aufgetreten wären. Es ergibt sich eine Reduktion der Anzahl getöteter Personen um 3,4% und der Anzahl schwerverletzter Personen um 2,2%. Die von Busch betrachtete automatische Notbremsung hat also positiven Einfluss auf das Unfallgeschehen. Leider kann eine ähnlich detaillierte Untersuchung für die Auslösung der automatischen Notbremsung mit der Hilfe von Stellvertretertrajektorien nicht durchgeführt werden, da die notwendigen Daten nicht vorhanden sind. Ein quantitativer Vergleich mit den anderen Auslösekriterien ist somit nicht möglich und muss Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

<sup>(h)</sup> German In Depth Accident Study

Die dritte These kann für die Situationsbewertung mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien nicht widerlegt werden. Es kann zwar gezeigt werden, dass das vorgestellte Verfahren eine Notbremsung nicht später als das der Verfolgung von Aufenthaltsgebieten auslöst, aber beim Vergleich mit dem Verfahren von Busch ist eine frühere Kollisionserkennung nur in Situationen mit mehreren Hindernissen möglich. Obwohl sich selbst kleine Verringerungen der Kollisionsgeschwindigkeit sehr positiv auswirken, kann nicht auf eine Reduktion der Verletzungsschwere geschlossen werden.

Für das kombinierte Auslösekriterium kann die dritte These hingegen widerlegt werden. Es wurde gezeigt, dass das kombinierte Auslösekriterium eine automatische Notbremsung in allen Verkehrssituationen früher als oder gleichzeitig mit den anderen Verfahren auslöst. Die zu erwartende Kollisionsgeschwindigkeit wird also verringert oder bleibt gleich. Für einen Teil der Verkehrssituationen ist somit eine Reduktion der Verletzungsschwere zu erwarten. Für diesen Anteil der Verkehrssituationen ist die dritte These damit widerlegt. In den übrigen Verkehrssituationen führt das kombinierte Auslösekriterium zu keiner Verschlechterung. Der Einsatz des kombinierten Auslösekriteriums führt somit insgesamt zu einem Sicherheitsgewinn.

### 6.3.5 Zuverlässigkeit

Wie in Abschnitt 4.2.5 dargestellt, kann bei der Lösung von Optimierungsproblemen nicht ausgeschlossen werden, dass nur ein lokales Minimum gefunden wurde. Eine Stellvertretertrajektorie gehört jedoch definitionsgemäß zu einem globalen Minimum. Nach einer erfolgreich terminierten Berechnung kann nicht entschieden werden, ob das gefundene Minimum lokal oder global ist. Der Algorithmus kann somit nicht garantieren, eine Stellvertretertrajektorie gefunden zu haben. Insbesondere kann nicht garantiert werden, dass der Wert der Bewertungsfunktion korrekt ist. Für Trajektorien, die fälschlicherweise für Stellvertretertrajektorien gehalten werden, ist der Wert der Bewertungsfunktion stets größer als für eine tatsächliche Stellvertretertrajektorie. Dies kann – falls der Schwellwert  $\alpha_{Schwell}$  dadurch überschritten wird – zu einer Fehlauslösung der automatischen Notbremsung führen.

Bei den ausgewerteten 655 Messfahrten mit erfolgreicher Trajektorienberechnung ist kein Fall aufgetreten, bei dem es zu einer Fehlauslösung gekommen wäre. Mit den aufgenommenen Daten kann nicht geklärt werden, ob die Trajektorien, die zu einem gerechtfertigten Auslösen geführt hätten, zu lokalen oder globalen Minima gehören.

Die Frage, ob lokale Minima mit gut gewählten Startlösungen oder anderen Algorithmen vermieden – oder zumindest als solche erkannt – werden können, muss Inhalt weiterer Untersuchungen sein.

### 6.3.6 Zusammenfassung der Auswertung

Durch die Widerlegung der ersten beiden Thesen konnte gezeigt werden, dass die Situationsbewertung mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien prinzipiell geeignet ist, unvermeidbare Kollisionen als solche zu erkennen. Für die Kombination des Verfahrens mit dem von Busch konnte auch die dritte These widerlegt werden. Damit wurde gezeigt, dass das kombinierte Verfahren geeignet ist, die Verletzungsschwere von Unfallopfern zu reduzieren. Die Tabelle 2.3 von Seite 17 wird erneut aufgegriffen und um die neuen Erkenntnisse erweitert:

	Kopischke	Busch	Aufenthaltsgebiete	Stellvertretertrajektorien	kombiniertes Auslösekriterium
realitätsnahe Trajektorien	0	++	— —	+	+ bis ++
statische Hindernisse	+	++	0	++	++
bewegtes Hindernis	—	++	0	—	++
Echtzeitfähigkeit	++	—	0	—	—
Mehrhindernisfähigkeit	—	—	+	++	++
Zeitpunkt der Auslösung (ein Hindernis)	—	++	—	+	++
Zeitpunkt der Auslösung (mehrere Hindernisse)	—	—	0	+	+
Fehlauslösungen	++	++	++	?	?

Tabelle 6.2: Übersicht über die Auslösekriterien für eine automatische Notbremsung



## 7 Fazit und Ausblick

Die automatische Notbremsung wird einen wesentlichen Beitrag zur weiteren Erhöhung der Verkehrssicherheit leisten. Sie stellt allerdings eine große technische Herausforderung dar: Da die Auslösung ohne Zutun des Fahrers erfolgen soll, muss die Verkehrssituation vom System sensiert und bewertet werden. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Bewertung der Umfelddaten – also auf der Frage, ob aus den aufgenommen Sensordaten geschlossen werden kann, dass eine Kollision unvermeidbar bevorsteht. Diese Bewertung stellt das Auslösekriterium der automatischen Notbremsung dar.

Das Auslösekriterium muss dabei zwei Zielen gerecht werden: Unter keinen Umständen darf die automatische Notbremsung ausgelöst werden, wenn die Kollision vermeidbar ist. Andererseits soll die automatische Notbremsung so früh wie möglich ausgelöst werden, um den Sicherheitsgewinn zu maximieren. Die Verfahren nach dem Stand der Technik haben hier – insbesondere bei Verkehrssituationen mit mehreren Hindernissen – Schwächen.

In dieser Arbeit wird ein neuartiges Verfahren zur Erkennung unvermeidbarer Kollisionen eingeführt und untersucht. Für die zu bewertende Verkehrssituation wird dabei zunächst eine spezielle Trajektorie – die sogenannte Stellvertretertrajektorie – berechnet. Aus dieser Stellvertretertrajektorie wird anschließend eine Maßzahl zur Bewertung der Verkehrssituation abgeleitet. Die Funktionsweise, die theoretischen Grundlagen und die algorithmische Umsetzung werden ausführlich in dieser Arbeit dargestellt. Mit den Daten eines Fahrversuchs wird die Leistungsfähigkeit des Verfahrens untersucht. Es zeigt sich, dass das Verfahren funktioniert und dass keine Fehlauflösungen beobachtet werden konnten. Das Verfahren ist in Verkehrssituationen mit nur einem relevanten Hindernis dem Verfahren von Busch unterlegen. Aufgrund der Mehrhindernisfähigkeit ist es in Kombination mit dem Verfahren von Busch allen anderen Verfahren nach dem Stand der Technik überlegen.

Es ist gelungen ein Verfahren zu entwickeln, mit dem Kollisionen früher als mit den bekannten Verfahren erkannt werden können. Eine automatische Notbremsung, die sich auf dieses Verfahren stützt, kann früher auslösen und damit die Folgen einer Kollision noch stärker mindern.

Die Erkennung von unvermeidbaren Kollisionen mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien wurde im Rahmen dieser Arbeit exemplarisch umgesetzt. Obwohl die Modelle und Algorithmen, die den Berechnungen zu Grunde liegen, zu guten Ergebnissen geführt haben, muss vor einer Nutzung des Verfahrens untersucht werden, ob andere Modelle und Algorithmen die Leistung steigern können. Es sollte geklärt werden, ob die Verwendung eines anderen Fahrzeugmodells die Qualität des beschriebenen Verfahrens verbessern kann. Das hier verwendete Einspurmodell berücksichtigt nur einen kleinen Teil der fahrdynamischen Zusammenhänge. Ebenso ist zu überprüfen ob die verwendete Pacejka-Magic-Formula ein geeignetes Reifenmodell darstellt. Das

Modell von Pacejka lässt wesentliche Größen, die das Reifenverhalten beeinflussen, unbeachtet. Zu diesen unbeachteten Größen gehören unter anderem die Reifentemperatur, der Sturzwinkel und die dynamische Veränderung der Radlast. Zu beachten ist hierbei die starke Abhängigkeit des Reifenmodells vom Fahrzeugmodell: Nur die Größen, die vom Fahrzeugmodell generiert werden, können vom Reifenmodell verwendet werden. Ferner muss untersucht werden, ob durch eine alternative Wahl der Bewertungsfunktion, die Leistungsfähigkeit gesteigert werden kann. Auch das ausgewählte Optimierungsverfahren muss einer Prüfung unterzogen werden. Das verwendete Programmpaket OC-ODE sollte mit anderen Programmpaketen zur Lösung von Optimalsteuerungsproblemen verglichen werden. Es ist bekannt, dass die Wahl der Startlösung gravierende Auswirkung auf die Stabilität und insbesondere auf die Rechenzeit von Optimierungsverfahren hat. Eine Heuristik, die Startlösungen in der Nähe eines Optimums bestimmt, sollte in einer weiteren Untersuchung entwickelt werden. Die Modellierungen der Fahrbahn und der Hindernisse haben sich stark an die später im Fahrversuch untersuchte Verkehrssituation angelehnt. Eine Modellierung allgemeiner Straßenverläufe und die Modellierung mobiler Hindernisse stehen noch aus. Bei Hindernissen wie Fahrzeugen und Fahrrädern ist ferner zu klären, wie die Entscheidungsfreiheit der Fahrer modelliert werden kann. Alle Kriterien zur Auslösung einer automatischen Notbremsung benötigen eine Schätzung des Reibbeiwertes. Die Überschätzung des Reibbeiwertes führt zu verspäteten Auslösungen und geht somit zu Lasten des Sicherheitsgewinns. Wie alle Auslösekriterien würde auch das hier vorgestellte Verfahren massiv von einer präziseren Reibbeiwertschätzung profitieren. Obwohl es beim Fahrversuch nicht zu Fehlauslösungen gekommen ist, besteht die theoretische Möglichkeit dazu. Ursächlich hierfür ist, dass mit dem Optimierungsverfahren nur ein lokales Minimum bestimmt wird und daraus eine Fehlinterpretation abgeleitet werden könnte. Weil nicht damit zu rechnen ist, dass ein Optimierungsverfahren entwickelt werden kann, welches dieses Problem nicht zeigt, muss angestrebt werden, die Anzahl von Fehlauslösungen abzuschätzen und auf ein erträgliches Maß zu begrenzen. Da das vorgestellte Verfahren zur Erkennung unvermeidbarer Kollisionen zu einem gewissen Mehraufwand führt, sollte der Sicherheitsgewinn anhand des realen Unfallgeschehens bestimmt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Situationsbewertung mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien eine vielversprechende Option als Auslösekriterium für eine automatische Notbremsung darstellt.

## **Glossar**

### **Antiblockiersystem**

Das Antiblockiersystem – meistens als ABS abgekürzt – hält ein Fahrzeug auch während einer Vollbremsung lenkbar. Dabei werden mit Raddrehzahlsensoren die Drehzahlen aller Räder permanent gemessen. Wird während einer Bremsung festgestellt, dass die Drehzahl eines Rades auf ein baldiges Blockieren hinweist, so wird der Bremsdruck an diesem Rad sowie einem weiteren Rad konstant gehalten und bei Bedarf sogar abgebaut. Um zu verhindern, dass ein Giermoment entsteht, wirken die Eingriffe immer auf ein linkes und ein rechtes Rad. Nach kurzer Dauer wird der Druck wieder aufgebaut. Der Vorgang wiederholt sich mehrmals, wodurch die typischen Vibrationen im Bremspedal entstehen. Das Antiblockiersystem kann in der Regel nicht vom Fahrer deaktiviert werden. Es dient ausschließlich der Unfallvermeidung. Bereits im Jahre 1936 ist auf eine „Vorrichtung zum Verhüten des Festbremsens“ ein Patent erteilt worden (Bec03), aber erst seit 1987 sind Systeme für Personenkraftwagen am Markt erhältlich.

### **Automatische Distanzregelung**

Die automatische Distanzregelung – alternativ auch als Adaptive Cruise Control (ACC) bezeichnet – hält eine vorgegebene Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug. Ist kein vorausfahrendes Fahrzeug vorhanden, wandelt sie sich zu einer Geschwindigkeitsregelanlage. Das System wird analog zur Geschwindigkeitsregelanlage manuell vom Fahrer aktiviert, wobei neben der Wunschgeschwindigkeit auch eine gewünschte Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug einzugeben ist. Der Abstand wird in der Regel mit einem Radar bestimmt. Obwohl Radare wegen der simultanen Messung von Abstand und Relativgeschwindigkeit prädestiniert erscheinen<sup>(a)</sup>, werden auch Systeme angeboten, die mit Lidaren arbeiten. Die automatische Distanzregelung greift mit Beschleunigungs- und Bremseneingriffen in die Längsdynamik des Fahrzeugs ein. Das System verhindert eine permanente und wesentliche Unterschreitung des Sicherheitsabstandes und kann so zu einer sichereren Fahrweise führen. In der Regel wird es dennoch zu den Komfortsystemen gezählt. Die ersten Systeme waren 1998 erhältlich.

### **Bremsassistent**

Viele Fahrer reagieren in Gefahrensituationen zu behutsam und bremsen zu schwach (Kno07; Sch04). Der Bremsassistent misst Pedalwege und -geschwindigkeiten oder den Druck im Bremssystem und bestimmt daraus, ob der Fahrer sich in Gefahr wähnt und möglichst stark bremsen will.

---

<sup>(a)</sup>Der Abstand wird aus der Laufzeit bestimmt, die Relativgeschwindigkeit aus der Dopplerverschiebung.

Gegebenenfalls wird der Bremsdruck erhöht und damit die Bremswirkung verstärkt. Das System ist permanent aktiv und kann nicht deaktiviert werden. Der Bremsassistent ist seit 1996 auf dem Markt erhältlich.

Zwischenzeitlich ist der Bremsassistent um Radarsensoren in der Fahrzeugfront erweitert worden, die zusätzlich ein situationsadaptives Verhalten des Systems ermöglichen und die Totzeit im Bremssystem reduzieren. Der Bremsdruck wird nur so weit erhöht, wie es zum Anhalten hinter dem vorausfahrenden Fahrzeug notwendig ist. Die Auslösung des Systems erfolgt aber weiterhin durch den Fahrer (Web05).

### **Elektronisches Stabilitätsprogramm**

Das elektronische Stabilitätsprogramm – in der Regel mit ESP abgekürzt – begrenzt den Schwimmwinkel (siehe Abschnitt 4.1.1) und verhindert so das Schleudern des Fahrzeugs. Neben den Raddrehzahlen werden die Gierrate, also die Drehgeschwindigkeit um die Hochachse, und der Lenkradwinkel gemessen. Sobald die Gierrate nicht zur Geschwindigkeit und zum Lenkradwinkel passt, wird das Fahrzeug durch das Abbremsen einzelner Räder stabilisiert. Das System überwacht das Fahrzeug permanent. Bei Bedarf kann es mit einem Taster deaktiviert werden. Nach jedem Motorstart und bei jeder Bremsung ist das elektronische Stabilitätsprogramm erneut aktiv. Bei der Bremsung unterstützt es die Bremskraftverteilung.

Das elektronische Stabilitätsprogramm kann innerhalb von Sekundenbruchteilen kritische Situationen entschärfen. Die Eingriffe geschehen zum großen Teil bei höheren Geschwindigkeiten, bei denen der so vermiedene Unfall oftmals auch Menschenleben gefordert hätte. Nach Zobel rettet ESP jedes Jahr mehr Menschenleben als der Airbag(ZSB<sup>+</sup>04). ESP wurde 1995 eingeführt und unterstützt den Fahrer in einigen kritischen Situationen.

### **Geschwindigkeitsregelanlage**

Die Aufgabe der Geschwindigkeitsregelanlage – auch als Tempomat bezeichnet – ist es, eine vorgegebene Geschwindigkeit zu halten. Sie versucht, den Einfluss veränderlicher Fahrwiderstände auszuregeln. Als Stellgröße dient das Motormoment. Zum Abbau zu großer Geschwindigkeiten wird ausschließlich das Motorschleppmoment genutzt. Die aktuelle Fahrgeschwindigkeit wird mit Hilfe von Raddrehzahlsensoren ermittelt. Der Fahrer muss das System manuell aktivieren und deaktivieren – in der Regel mit einem Lenkstockschalter. Die Geschwindigkeitsregelanlage kann den Fahrer entlasten, sodass dieser in kritischen Situationen noch über „Aufmerksamkeitsreserven“ verfügt.

### **Spurverlassenswarnung und Heading Control**

Die Spurverlassenswarnung – auch als Lane Departure Warning (LDW) bezeichnet – soll ein ungewolltes Abkommen von der Fahrspur verhindern. Die Spurlage



---

wird von einer vorwärtsgerichteten Kamera oder alternativ von abwärtsgerichteten Infrarotsensoren bestimmt. Sobald ein Abkommen von der Spur erkannt wird, erfolgt eine akustische oder haptische Warnung. Beide Formen der Warnung sollen den Fahrer an das Überfahren eines Nagelbandes erinnern und ihn so zu einer geeigneten Gegenreaktion provozieren. Die Warnung entfällt, wenn der Fahrer durch Setzen des Blinkers einen beabsichtigten Spurwechsel ankündigt. Die verfügbaren Systeme aktivieren sich ab einer Mindestgeschwindigkeit, die zwischen  $45 \frac{km}{h}$  und  $90 \frac{km}{h}$  liegt. Die Spurverlassenswarnung unterstützt den Fahrer indem es ihn auf Fehler hinweist.

Genau wie die Spurverlassenswarnung soll Heading Control Unfälle, die durch ein Abkommen von der Fahrspur entstehen, verhindern. Im Unterschied zur Spurverlassenswarnung wird ein Lenkmoment aufgebracht, sobald ein Abkommen von der Fahrspur zu erkennen ist. Als Sensoren werden Kamerasysteme eingesetzt, da nur diese auch den künftigen Fahrspurverlauf erkennen können. Die Funktion muss manuell aktiviert werden.



## Literaturverzeichnis

- [AM01] Anderson, Robert ; McLean, Jack: Vehicle design and speed and pedestrian injury: Australia's involvement in the International Harmonised Research Activities Pedestrian Safety Expert Group. In: *Road Safety Research, Policing and Education Conference 2001*. Queensland : Land Transport and Safety Division, 2001
- [Bec03] Becker, Rolf: *Magazin zur Bosch-Geschichte*. Stuttgart : Robert Bosch GmbH, 2003. – Firmenschrift
- [Bew05] Bewersdorf, Cornelia: *Zulassung und Haftung bei Fahrerassistenzsystemen im Straßenverkehr*. Berlin : Duncker & Humblot, 2005
- [Bor04] Bortz, Jürgen: *Statistik für Sozialwissenschaftler*. 6. Ausgabe. Berlin, Heidelberg : Springer, 2004
- [Büs96] Büskens, Christof: *Lösung optimaler Steuerprozesse – Lösung adjungierter Variablen – Automatische Gitteranpassung, NUDOCCCS Version 8.04*. Bremen : Universität Bremen, 1996. – Bedienungsanleitung
- [Bus04] Busch, Sebastian: *Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Prognose des Gewinns ausgewählter Fahrerassistenzsysteme*. Düsseldorf : VDI Verlag, 2004. – Dissertation
- [Dai06] Daimler Chrysler: Vision vom „Unfallfreien Fahren“. In: *Geschäftsbericht 2006*. Stuttgart : Daimler, 2006
- [Die04] Dietsche, Karl-Heinz: *Fahrstabilisierungssysteme*. Stuttgart : Robert Bosch GmbH, 2004
- [Gay07] Gayko, Jens: *CMBS - Collision Mitigation Brake System*. Offenbach : Honda R&D Europe, 2007
- [Ger06a] Gerdts, Matthias: *Numerische Lösungsverfahren für Optimalsteuerungsprobleme*. Hamburg : Universität Hamburg, 2006
- [Ger06b] Gerdts, Matthias: *Optimierung*. Hamburg : Universität Hamburg, 2006. – Vorlesungsmanuskript
- [Ger06c] Gerdts, Matthias: *User's Guide OC-ODE*. Hamburg : Universität Hamburg, 2006. – Bedienungsanleitung
- [GKMBS08] Gerdts, Matthias ; Karrenberg, Simon ; Müller-Beßler, Bernhard ; Stock, Gregor: Generating Optimal Trajectories for an Automatically Driving Car. In: *Optimization and Engineering*. Heidelberg : Springer, 2008. – zur Veröffentlichung angenommen

- [JJG02] Jansson, Jonas ; Johansson, Jonas ; Gustafsson, Frederik: Decision Making for Collision Avoidance Systems. In: *SAE technical paper series* Bd. SAE2002-01-0403. Warrendale : SAE International, 2002
- [Kno07] Knoll, Peter M.: *Bester Beifahrer, DVR-Presseseminar*. Bonn : Deutscher Verkehrssicherheitsrat, 2007
- [Kop99] Kopischke, Stephan: *Verfahren und Steuereinrichtung zur Minimierung von Unfallfolgen*. München : Deutsche Patent- und Markenamt, 1999. – Offenlegungsschrift DE 198 28 693 A 1
- [Kop00] Kopischke, Stephan: *Entwicklung einer Notbremsfunktion mit Rapid Prototyping Methoden*. Braunschweig : Technische Universität Braunschweig, 2000
- [Lag00] Lages, Ulrich: *Untersuchungen zur aktiven Unfallvermeidung von Kraftfahrzeugen*. Düsseldorf : VDI Verlag, 2000
- [LP99] Leaf, W.A. ; Preusser, D.F.: *Literatur Review on Vehicle Travel Speeds and Pedestrian Injuries*. Washington : National Highway Traffic Safety Administration, 1999
- [Mah07] Mahieu, Yves: *Statistik kurz gefasst, Verkehr*. Bd. 77/2007. Luxembourg : Eurostat, 2007
- [Mar04] Margono, Buntoro S.: *Optimierung von Bewegungsabläufen mit schwingungsfreien Endpositionen zur Verkürzung der Arbeitszyklen von Container-Schnellumschlaganlagen*. Duisburg : Universität Duisburg-Essen, 2004. – Dissertation
- [MBP05] Marstaller, Rainer ; Bubb, Heiner ; Preis, Christian: Development of a risk analysis concept during driving with advanced driving assistance systems with support in longitudinal and transverse direction. In: *AAET 2005 – Automation, Assistance and Embedded Real Time Platforms for Transportation*. Braunschweig : Gesamtzentrum für Verkehr, 2005
- [Mic94] Michel, Thomas: *Fortran 90*. Mannheim : BI Wissenschaftsverlag, 1994
- [Nza01] Nzali, Appolinaire: *Zur Lösung optimaler Steuerungsprobleme: Diskretisierung, Konvergenz, Anwendung*. Berlin : Humboldt-Universität zu Berlin, 2001. – Dissertation
- [PBL89] Pacejka, Hans B. ; Bakker, Egbert ; Lidnwe, Lars: A new tire model with an application in vehicle dynamics studies. In: *SAE technical paper series* Bd. 890087. Warrendale : SAE International, 1989

- [Pij07] Pijpers, Matrin: *Sensors in ADAS*. Twente : Universiteit Twente, 2007
- [Ros05] Rosendahl, Ricki: *NUDOCCCS - Kurzbeschreibung*. Hamburg : Universität Hamburg, 2005. – unveröffentlicht
- [RS40] Riekert, Paul ; Schunck, T. E.: Zur Fahrmechanik des gummbereiften Kraftfahrzeugs. In: *Archive of Applied Mechanics (Ingenieur Archiv)* Bd. 11. Berlin : Springer, 1940
- [Sch04] Schäfer, Bernd-Josef: Prädiktive Fahrerassistenzsysteme – vom Komfortsystem zur aktiven Unfallvermeidung. In: *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme, VDI-Berichte* Bd. 1864. Düsseldorf : VDI, 2004
- [SK06] Schwarz, Hans R. ; Köckler, Norbert: *Numerische Mathematik*. 6. Wiesbaden : Teubner, 2006
- [Stü03] Stüker, Dirk: *Heterogene Sensordatenfusion zur robusten Objektverfolgung im automobilen Straßenverkehr*. Oldenburg : Deutsche Nationalbibliothek, 2003. – Dissertation
- [Sta07] Statistisches Bundesamt: *Unfallgeschehen im Straßenverkehr 2006*. Wiesbaden : Statistisches Bundesamt, 2007
- [Sta08] Statistisches Bundesamt: *Erstmals weniger als 5000 Verkehrstote im Jahr 2007*. Wiesbaden : Statistisches Bundesamt, 2008. – Pressemitteilung Nr. 071
- [SW03] Seiffert, Ulrich ; Wech, Lothar: *Automotive Safety Handbook*. 2. Ausgabe. Warrendale : SAE International, 2003
- [Uni68] United Nations: *Convention on Road Traffic (Wiener Weltabkommen)*. Wien : United Nations, 1968. – aktualisierter Stand vom 19.4.2007
- [Web05] Weber, Thomas: *Faszination Forschung & Technik*. Bd. 2/2005. Stuttgart : DaimlerChrysler, 2005. – Firmenschrift
- [Wei03] Weiße, Jochen: *Beitrag zur Entwicklung eines optimierten Bremsassistenten*. Stuttgart : Ergonomia Verlag, 2003. – Dissertation
- [WS06] Wallentowitz, Henning ; Schrüllkamp, Thomas: *Fahrwerkentwicklungen am ika*. Aachen : RWTH Aachen, 2006
- [ZSB<sup>+</sup>04] Zobel, Robert ; Stanzel, Micheal ; Becker, Holger ; Scheef, Joachim ; Rieger, Gerhard: Active safety systems change accident environment of vehicles significantly - a challenge for vehicle design. In:

*19th International Technical Conference in the Enhanced Safety of Vehicles.* Washington : National Highway Traffic Safety Administration, 2004